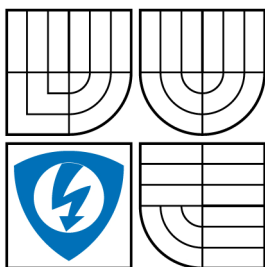


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VYUŽITÍ METAMATERIÁLŮ PRO ZLEPŠENÍ PARAMETRŮ ANTÉN

IMPROVING ANTENNA PARAMETERS BY THE APPLICATION OF METAMATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VLADIMÍR ŠPORIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA

BRNO 2007



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Vladimír Šporik

ID: 83045

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Využití metamateriálů pro zlepšení parametrů antén

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte základní principy metamateriálů a možnosti jejich využití pro realizaci elektricky malých antén. Zaměřte se na struktury, které lze snadno realizovat planární technologií.

Ve vhodně zvoleném programu vytvořte počítačový model elektricky malé antény z kombinovaného levo-/pravotočivého vedení. Detailně porovnejte parametry různých variant této antény a vyberte typ, který je nejvhodnější pro realizaci.

Vybranou anténu optimalizujte, vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] LAI, A., LEONG, K.M.K., ITOH, T. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures. IEEE Transactions on Antenna and Propagation. 2007, vol. 55, no. 3, p. 868-876.

[2] QURESHI, F., ANTONIADES, M.A., ELEFThERIADES, V. A compact and low-profile metamaterial ring antenna with vertical polarization. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2005, vol. 4, p. 333-336.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práve třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Vladimír Šporik
Bytem: Trnkova 11, Olomouc, 77200
Narozen/a (datum a místo): 22. srpna 1984 v Olomouci
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Využití metamateriálů pro zlepšení parametrů antén

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

.....

Nabyvatel

.....

Autor

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem planární antény rezonančního typu, která je založena na kombinaci levo- a pravotočivých vlastností přenosového vedení. Toto vedení se nazývá CRLH vedení a vychází ze tzv. hříbkové struktury. Výhody navržené koncepce antény jsou demonstrovány detailním srovnáním jejich základních parametrů s parametry konvenční flíčkové antény.

KLÍČOVÁ SLOVA: planární anténa, anténa rezonančního typu, CRLH vedení, flíčková anténa, metamateriál, činitel odrazu; vyzařovací charakteristika

ABSTRACT

The thesis is focused on the design of a planar resonant-type antenna, which exploits a proper combination of left- and right-handed properties of transmission lines. This transmission line is called CRLH TL and is based on Sievenpiper mushroom structure. Advantages of the proposed antenna concept are demonstrated by a detailed comparison of its basic properties with the properties of a conventional patch antenna.

KEY WORDS: planar antenna, resonant-type antenna, CRLH TL, patch antenna, metamaterial, return loss, radiation pattern

Bibliografická citace práce:

ŠPORIK, V. *Využití metamateriálů pro zlepšení parametrů antén*. Diplomová práce.

Brno: Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně, 2009. 70 stran.

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Využití metamateriálů pro zlepšení parametrů antén“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňkovi Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	12
1 ÚVOD.....	13
2 ZÁKLADNÍ PRINCIP METAMATERIÁLŮ.....	14
3 PŘENOSOVÉ VEDENÍ CRLH.....	15
4 CRLH ANTÉNA PRO PÁSMO 3 GHZ.....	19
4.1 MODEL Y ANTÉN V PROGRAMU CST MWS.....	20
4.1.1 CRLH ANTÉNA	21
4.1.2 ANTÉNA S INDUKČNĚ VÁZANÝM VEDENÍM	21
4.1.3 FLÍČKOVÁ ANTÉNA	22
4.2 VÝSLEDKY SIMULACE.....	23
4.2.1 ČINITEL ODRAZU S_{11}	23
4.2.2 VYZAŘOVACÍ CHARAKTERISTIKA	25
4.2.3 PROUDOVÉ ROZLOŽENÍ.....	28
5 NÁVRH WILKINSONOVA 3DB DĚLIČE	29
5.1 TEORETICKÝ ROZBOR	29
5.1.1 SYNTÉZA VEDENÍ Z_{01}	30
5.1.2 SYNTÉZA VEDENÍ Z_{02}	32
5.2 MODEL DĚLIČE VÝKONU	34
5.2.1 BLOKOVÁ STRUKTURU DĚLIČE VÝKONU.....	34
5.2.2 MODEL DĚLIČE V PROGRAMU CST MWS	35
5.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ DĚLIČE VÝKONU	36
6 CRLH ANTÉNA PRO PÁSMO 5,4 GHZ.....	37
6.1 MODEL Y ANTÉN V CST MWS	37
6.1.1 CRLH ANTÉNA, 1ŘADA BUNĚK	37
6.1.2 CRLH ANTÉNA, 2ŘADY BUNĚK	39
6.2 SIMULACE ANTÉN V PROGRAMU CST MWS	41
6.2.1 ČINITEL ODRAZU	41
6.2.2 ROZLOŽENÍ PROUDŮ NA ANTÉNÁCH.....	44
6.2.3 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH MÓDŮ	53
6.2.4 VLIV PRVKŮ CRLH BUŇKY	57
6.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ CRLH ANTÉNY.....	58
7 ZÁVĚR.....	60
POUŽITÁ LITERATURA.....	62
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	63
SEZNAM PŘÍLOH.....	65

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Rozložení vektorů \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} a $\mathbf{\Pi}$ pro pravotočivého vedení (RH)(vlevo) a pro levotočivého vedení (LH)(vpravo).	14
Obr. 3.1 Náhradní obvodové modely levotočivého vedení (LH), pravotočivého vedení (RH) a kombinovaného vedení (CRLH).	15
Obr. 3.2 Mikropásková realizace CRLH vedení [1].	16
Obr. 3.3 Disperzní diagram CRLH vedení složeného z N buněk, rezonanční body jsou zvýrazněny [7].	18
Obr. 4.1 Anténa složená z N buněk CRLH vedení (vlevo) [1]. Pohled shora na dvě buňky CRLH vedení (vpravo).	19
Obr. 4.2 Rozložení rezonančních kmitočtů CRLH vedení pro daný mód pro různý počet CRLH buněk.	20
Obr. 4.3 Layout modelu antény v programu CST MWS, CRLH anténa (vlevo), anténa s induktivně vázaným vedením (vpravo).	21
Obr. 4.4 Model konvenční flíčkové antény napájené koaxiální sondou v programu CST MWS	22
Obr. 4.5 Činitel odrazu CRLH antény.	23
Obr. 4.6 Činitel odrazu antény s indukčně vázaným vedením.	23
Obr. 4.7 Činitel odrazu konvenční flíčkové antény.	24
Obr. 4.8 Činitel odrazu pro všechny tři modely antén. Porovnání s průběhy z článku [1] vpravo.	24
Obr. 4.9 Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pracující ve dvou módech.	25
Obr. 4.10 Vyzařovací charakteristiky antény s indukčně vázaným vedením (nahore) a konvenční flíčkové antény (dole).	26
Obr. 4.11 Dvojměrné směrové charakteristiky CRLH antény pro úhel $\varphi = 90^\circ$ pro dva módy (vlevo $n = 0$, vpravo $n = -1$).	27
Obr. 4.12 Dvojměrné směrové charakteristiky antén pro úhel $\varphi = 90^\circ$	27
Obr. 4.13 Rozložení proudové hustoty u dvou buněk CRLH antény [1]: a) půlvlnný režim (odpovídá módu $n = -1$), b) nekonečná vlnová délka (režim $n = 0$).	28
Obr. 4.14 Rozložení proudové hustoty u dvou buněk CRLH antény vypočtené v CST MWS: a) půlvlnný režim (odpovídá módu $n = -1$), b) nekonečná vlnová délka (režim $n = 0$).	28
Obr. 5.1 Principální zapojení děliče výkonu.	29
Obr. 5.2 Možné způsoby realizace děliče výkonu.	30

Obr. 5.3 Ověření správnosti výpočtu pomocí programu Ansoft Designer. $Z_{01} = 50,0 \Omega$	31
Obr. 5.4 Ověření správnosti výpočtu pomocí programu Ansoft Designer. $Z_{01} = 70,7 \Omega$	33
Obr. 5.5 Blokové zapojení přizpůsobeného WDV v programu Ansoft Designer SV.	34
Obr. 5.6 Výsledné průběhy navrženého děliče v programu Ansoft Designer SV.	34
Obr. 5.7 WDV v programu CST MWS(vlevo) a v Ansoft(vpravo)	35
Obr. 5.8 Průběhy s_{11} a s_{21} pro vedení Z_{02} o délce $\lambda_g/4 = 8,37\text{mm}$. Při zapojení dle Obr. 5.7.	36
Obr. 5.9 Srovnání výsledku simulace CST a vyrobeného děliče.	36
Obr. 6.1 Vlevo layout modelu CRLH antény, vpravo detail jedné buňky CRLH antény.	37
Obr. 6.2 Vlevo layout modelu CRLH antény se dvěma buňkami, vpravo model CRLH antény tvořené třemi buňkami.....	38
Obr. 6.3 Vlevo layout modelu CRLH antény pro dvě řady buněk, vpravo detail CRLH antény.....	39
Obr. 6.4 Vlevo layout modelu CRLH antény se dvěma buňkami a dvěma řadami, vpravo model CRLH antény tvořené třemi buňkami řadami.....	40
Obr. 6.5 Činitel odrazu antény tvořené jednou řadou CRLH buněk.....	41
Obr. 6.6 Činitel odrazu antény tvořené dvěma řadami CRLH buněk.	42
Obr. 6.7 Společný průběh činitele odrazu antény tvořené jednou řadou CRLH buněk pro různý počet buněk	43
Obr. 6.8 Společný průběh činitele odrazu antény tvořené dvěma řadami CRLH buněk pro různý počet buněk	43
Obr. 6.9 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x1 buňka při $f = 6,40 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{0}$	44
Obr. 6.10 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x1 buňka při $f = 6,72 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{0}$	44
Obr. 6.11 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x1 buňka při $f = 5,36 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{-1}$	45
Obr. 6.12 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x1 buňka při $f = 5,47 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{-1}$	45
Obr. 6.13 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x2 buňka při $f = 6,62 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{0}$	46
Obr. 6.14 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 6,97 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{0}$	46
Obr. 6.15 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x2 buňka při $f = 5,99 \text{ GHz}$, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $\mathbf{n} = \mathbf{-1}$	47

- Obr. 6.16** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 6,11$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$ 47
- Obr. 6.17** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 5,42$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$ 48
- Obr. 6.18** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 5,52$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$ 48
- Obr. 6.19** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 6,73$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$ 49
- Obr. 6.20** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f = 7,00$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$ 49
- Obr. 6.21** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 6,27$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$ 50
- Obr. 6.22** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f = 6,42$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$ 50
- Obr. 6.23** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 5,82$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$ 51
- Obr. 6.24** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 5,91$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$ 51
- Obr. 6.25** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 5,45$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -3$ 52
- Obr. 6.26** Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f = 5,55$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -3$ 52
- Obr. 6.27** Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro 2 a 3 buňky. Mód $n = -2$ 53
- Obr. 6.28** Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro 1, 2 a 3 buňky. Mód $n = -1$ 54
- Obr. 6.29** Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro 1, 2 a 3 buňky. Mód $n = 0$ 55
- Obr. 6.30** Vliv vzdálenosti mezi flíčky w_3 na činitel odrazu s_{11} 57
- Obr. 6.31** Vliv poloměru via na činitel odrazu s_{11} 57
- Obr. 6.32** Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 1x1 CRLH buňkou. 58
- Obr. 6.33** Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 2x1 CRLH buňkami. 58
- Obr. 6.34** Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 1x2 CRLH buňkami. 59
- Obr. 6.35** Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 2x2 CRLH buňkami. 59

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4.1</i>	<i>Rezonanční kmitočty CRLH vedení pro daný mód a počet buněk.....</i>	<i>19</i>
<i>Tab. 4.2</i>	<i>Parametry modelu CRLH antény v programu CST MWS.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 4.3</i>	<i>Parametry modelu konveční flíčkové antény v programu CST MWS.</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 5.1</i>	<i>Souhrn výsledků syntézy mikropáskového vedení pro dvě různě charakteristické impedance.</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 5.2</i>	<i>Parametry modelu CRLH antény v programu CST MWS.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6.1</i>	<i>Parametry upraveného modelu CRLH antény v programu CST MWS pro jednu řadu CRLH buněk.....</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 6.2</i>	<i>Parametry upraveného modelu CRLH antény v programu CST MWS pro dvě řady CRLH buněk.</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6.3</i>	<i>Souhrn výsledku simulace pro různý počet buněk a mód, ve kterém CRLH anténa pracuje. Vyznačeny jsou nejlepší výsledky v dané proměnné.</i>	<i>56</i>

1 ÚVOD

Poslední dobou jsme svědky dynamického rozvoje mobilních komunikačních zařízení. Jednou z důležitých vlastností těchto zařízení je jejich co možná nejmenší velikost. Velká část vývoje se proto věnuje zlepšování parametrů dílčích komponentů mobilních zařízení a současně se snaží o jejich miniaturizaci.

Jedním z nejdůležitějších komponentů mobilního komunikačního zařízení je anténa. Určitého stupně miniaturizace dosahují tzv. mikropáskové antény. Tyto antény pracují většinou v půlvlnné rezonanci. Oblíbeny jsou především pro nízkou hmotnost, malý objem (převážně plošný rozměr) a také nízké výrobní náklady. Nevýhodou je poměrně úzké pracovní kmitočtové pásmo a nižší zisk [3].

Tato práce se zabývá anténou, jejíž pracovní kmitočet nezávisí na rezonanční frekvenci. Fyzická velikost této antény tudíž není svázaná s délkou vlny. Anténa je tvořena rezonančním obvodem, který tvoří buňku s nulovým fázovým posuvem. Tento rezonanční obvod můžeme sestavit z prvků se soustředěnými nebo rozprostřenými parametry. Důraz je kladen na jednoduché planární řešení [1].

Podrobnější popis zkoumané antény je uveden v následujících kapitolách. Ukážeme si náhradní schéma antény, tvořené parazitními indukčnostmi a kapacitami. Porovnáme různé modifikace antény založené na tzv. hříbkové struktuře buněk[8] a provedeme srovnání s mikropáskovou anténou [9], která pracuje na stejném kmitočtu. Mezi sledované parametry antén bude patřit činitel odrazu na vstupu antény s_{11} , vyzařovací diagram a konečné rozměry antény.

2 ZÁKLADNÍ PRINCIP METAMATERIÁLŮ

Termínem metamateriál je označován materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Jedná se o uměle vytvořený materiál vyznačující se zápornou efektivní permitivitou ϵ_{ef} a permeabilitou μ_{ef} .

Metamateriál se obvykle vytváří jako uskupení periodicky se opakujících kovových elementů, jejichž perioda opakování p je mnohem kratší než délka vlny šířící se prostředím. Je-li pro šířící se vlnu splněna podmínka [2]

$$p < \frac{\lambda_0}{4}, \quad (2.1)$$

prostředí lze považovat za homogenní. Konstantu šíření k v takovém prostředí lze určit dle vztahu [4]:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{ef}} \mu_{\text{ef}}}, \quad (2.2)$$

kde ω je úhlová frekvence vlnění a c je rychlost světla ve vakuu.

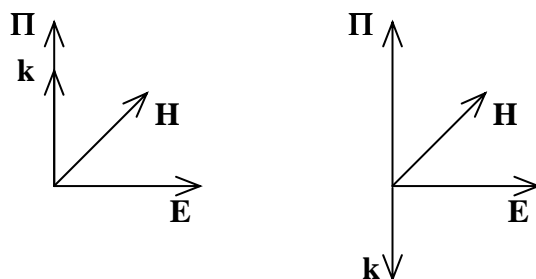
Pointigův vektor Π udává směr šíření energie a je popsán vektorovým součinem dle

$$\Pi = \mathbf{E} \times \mathbf{H}, \quad (2.3)$$

kde \mathbf{E} vektoru intenzity elektrického pole a \mathbf{H} vektor intenzity magnetického pole.

Jsou-li efektivní permitivita ϵ_{ef} a efektivní permeabilita μ_{ef} kladné hodnoty, potom i konstanta šíření k je kladná. Vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} a \mathbf{k} tvoří ortogonální systém daný pravidlem pravé ruky (viz Obr. 2.1). Takto se chovají běžné materiály, označované často jako pravotočivé (*right-handed*, RH).

Budou-li ϵ_{ef} a μ_{ef} nabývat současně záporných hodnot, potom konstanta šíření k bude záporná. Vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} a \mathbf{k} tvoří ortogonální systém daný pravidlem levé ruky (viz Obr. 2.1). Tyto materiály bývají označovány jako levotočivé (*left-handed*, LH) nebo jako metamateriály.

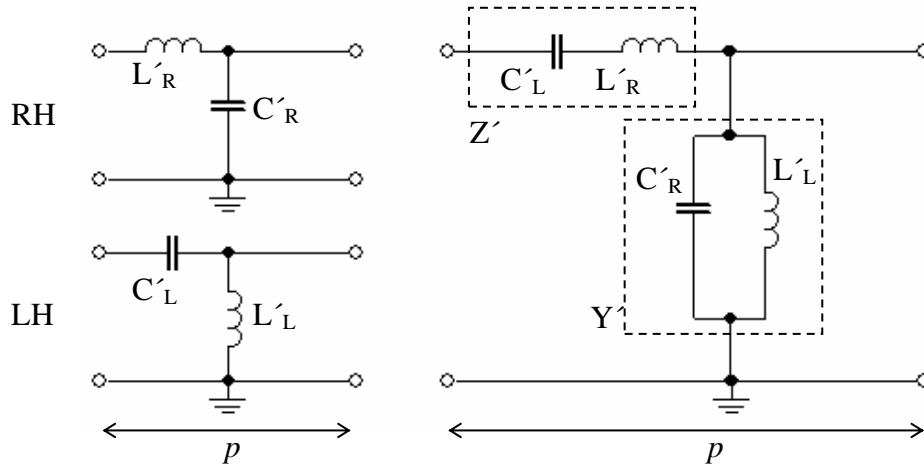


Obr. 2.1 Rozložení vektorů \mathbf{E} , \mathbf{H} , \mathbf{k} a Π pro pravotočivého vedení (RH)(vlevo) a pro levotočivého vedení (LH)(vpravo).

3 PŘENOSOVÉ VEDENÍ CRLH

Levotočivý materiál lze realizovat vedením. Je-li splněna podmínka (2.1), lze obvod realizovat prvky se soustředěnými parametry. Je-li perioda opakování p menší než čtvrtina vlnové délky na vedení $\lambda_g/4$, jeví se levotočivé vedení jako homogenní [2].

Čistě levotočivý materiál ovšem vyrobit nelze, neboť je vždy doprovázen nežádoucím pravotočivým efektem. Proto jsou tyto materiály označovány jako kombinované levo-pravotočivé (CRLH). Náhradní obvod takového vedení o délce p je uveden na Obr. 3.1. Apostrof značí velikost prvku vztahenou na periodu p .



Obr. 3.1 Náhradní obvodové modely levotočivého vedení (LH), pravotočivého vedení (RH) a kombinovaného vedení (CRLH).

Obvodový model CRLH vedení (tvořeného jednou buňkou) na Obr. 3.1. se skládá z indukčnosti L'_R v sérii s kapacitou C'_L a z paralelní kombinace kapacity C'_R a indukčnosti L'_L . Prvky C'_L a L'_L určují levotočivé chování vedení, prvky L'_R a C'_R určují nežádoucí chování pravotočivé.

Vedení lze popsat sériovou impedancí Z' a paralelní admitancí Y' (viz Obr. 3.1.) [2]

$$Z'(\omega) = j \left(\omega L'_R - \frac{1}{\omega C'_L} \right), \quad (3.1)$$

$$Y'(\omega) = j \left(\omega C'_R - \frac{1}{\omega L'_L} \right). \quad (3.2)$$

Charakteristickou impedanci CRLH vedení lze získat dle vztahu [2]

$$Z_0 = \sqrt{Z'/Y'}. \quad (3.3)$$

Konstanta šíření CRLH vedení je ryze imaginární [2]

$$k = \alpha + j\beta, \quad k = j\beta = \sqrt{Z'Y'}, \quad (3.4)$$

kde α je měrný vlnový útlum a β je fázová konstanta šíření.

Fázová konstanta v materiálu je dána vztahem [2]

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_{\text{ef}} \mu_{\text{ef}}} . \quad (3.5)$$

Úpravou (3.4) a (3.5) získáme [2]

$$-\omega^2 \mu_{\text{ef}} \epsilon_{\text{ef}} = Z' Y' . \quad (3.6)$$

Vlnová impedance je určena [2]

$$\eta = \sqrt{\mu_{\text{ef}} \epsilon_{\text{ef}}} . \quad (3.7)$$

Vztah mezi charakteristickou impedancí Z_0 a vlnovou impedancí [2] je

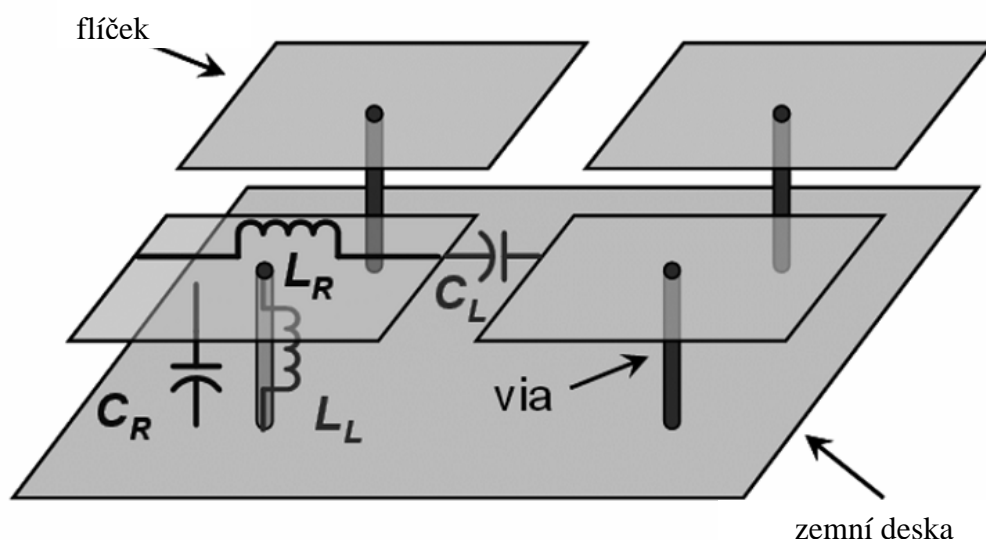
$$\frac{Z'}{Y'} = \frac{\mu_{\text{ef}}}{\epsilon_{\text{ef}}} . \quad (3.8)$$

Efektivní permitivitu ϵ_{ef} a permeabilitu μ_{ef} vedení získáme dosazením (3.8) do (3.6) [2]

$$\mu_{\text{ef}} = \frac{Z'}{j\omega} = L'_R - \frac{1}{\omega^2 C'_L} , \quad (3.9a)$$

$$\epsilon_{\text{ef}} = \frac{Y'}{j\omega} = C'_R - \frac{1}{\omega^2 L'_L} . \quad (3.9b)$$

Nyní se zabývejme fyzickou realizací CRLH struktury, navrhneť planární strukturu, která bude realizovat výše popsané obvodové prvky CRLH vedení. Vyděme přitom ze struktury sestávající z tzv. hříbků [1], [8]. (viz Obr. 3.2).



Obr. 3.2 Mikropásková realizace CRLH vedení [1].

Parazitní pravotočivý efekt představuje indukčnost L_R' tvořená mikropáskovým vedením. Kapacita C_R' vzniká mezi mikropáskovým vedením a zemní deskou. Levotočivý efekt struktury představuje kapacita C_L' , která vznikla ve štěrbině mezi jednotlivými mikropáskovými prvky. Indukčnost L_L' je vytvořena pokovenou dírou, která je umístěna do geometrického středu mikropásku a je spojena se zemní deskou.

Změnou fyzických rozměrů navržené struktury (velikost mikropásku, změna poloměru pokovené díry, dielektrická konstanta, mezera mezi mikropásky) lze ladit reaktance jak induktivní tak kapacitní [1]. To nám umožňuje vytvořit frekvenčně laditelný materiál, který není závislý na fyzických rozměrech, jako tomu je v případě mikropáskové antény pracující v půlvlnné rezonanci [8].

Rezonanční podmínka CRLH vedení je dána vztahem [7]

$$\beta_n \cdot N \cdot p = n\pi, \quad (3.10)$$

kde N je počet CRLH buněk, p je délka jedné CRLH buňky, β_n je fázová konstanta šíření vlny v CRLH buňce a n určuje mód v jakém anténa bude pracovat. Může nabývat kladných i záporných hodnot včetně nuly. Je-li $n = 0$, potom mluvíme o nekonečné vlnové rezonanci ($\beta_0 = 0, \omega \neq 0$), která je určena paralelní rezonancí ω_{par} (3.13).

Pravotočivé vlastnosti CRLH vedení se projeví vlivem kapacity C_R' a indukčnosti L_R' na kmitočtu

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{C_R' L_R'}}. \quad (3.11)$$

Levotočivé vlastnosti CRLH vedení určené kapacitou C_L' a indukčností L_L' na kmitočtu

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{C_L' L_L'}}. \quad (3.12)$$

K paralelní rezonanci CRLH buňky dochází na frekvenci

$$\omega_{\text{par}} = \frac{1}{\sqrt{C_R' L_L'}} \quad (3.13)$$

a sériová rezonance CRLH buňky lze určit dle

$$\omega_{\text{ser}} = \frac{1}{\sqrt{C_L' L_R'}}. \quad (3.14)$$

Užitím Blochova-Floquetova teorému ve spojení periodickými okrajovými podmínkami (PBC) je fázová konstanta CRLH buňky určena rovnicí [1]

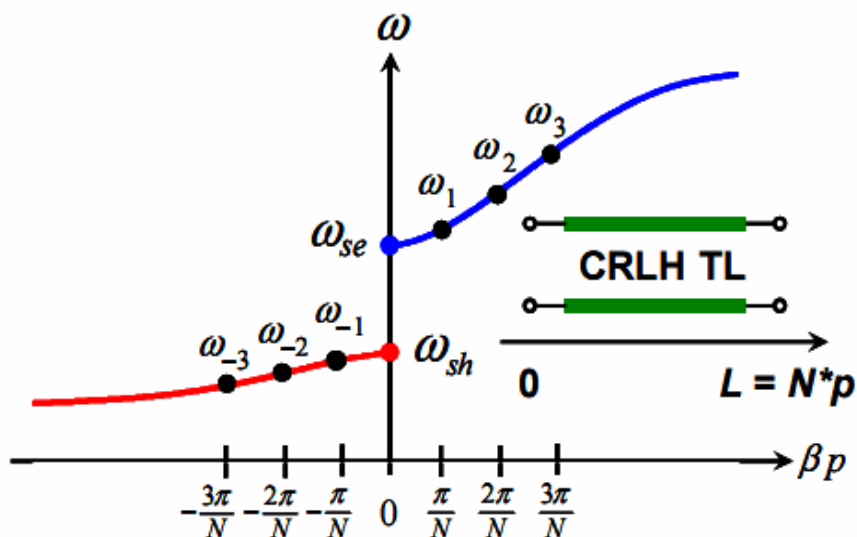
$$\beta_n = \frac{1}{p} \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_L^2}{\omega_n^2} + \frac{\omega_n^2}{\omega_R^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{\text{ser}}^2} - \frac{\omega_n^2}{\omega_{\text{par}}^2} \right) \right), \quad (3.15)$$

Dosadíme-li rezonační podmínku (3.10) do rovnice (3.15) získáme vztah (3.16)[7], popisující disperzní vlastnosti struktury nezávislé na délce jedné CRLH buňky p .

$$\frac{n\pi}{N} = \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_L^2}{\omega_n^2} + \frac{\omega_n^2}{\omega_R^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{\text{ser}}^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{\text{par}}^2} \right) \right), \quad (3.16)$$

kde n značí mód, N je počet CRLH buněk a ω_n je úhlový kmitočet zvoleného módu.

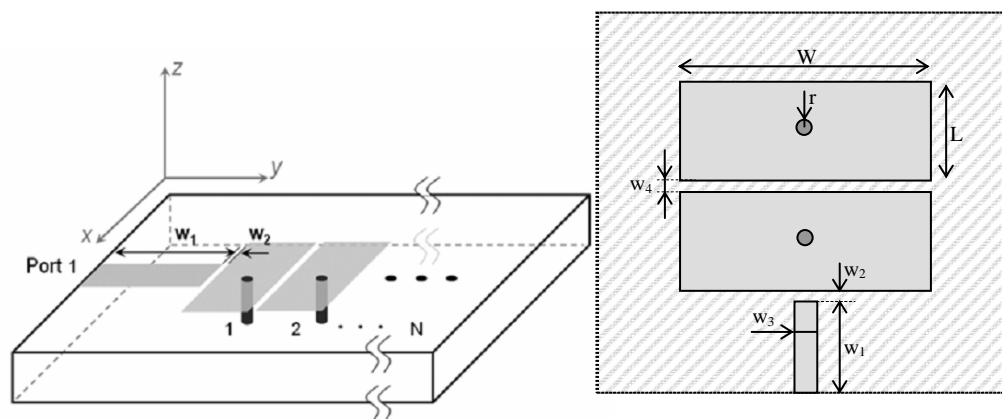
Na Obr. 3.3 je zobrazen disperzní diagram CRLH vedení složeného z N buněk. Diagram je popsán rovnicí (3.16) a popisuje vliv módu vedení a počtu buněk na rezonanční kmitočet struktury.



Obr. 3.3 Disperzní diagram CRLH vedení složeného z N buněk, rezonanční body jsou zvýrazněny [7].

4 CRLH ANTÉNA PRO PÁSMO 3 GHz

V této kapitole je představena mikropásková anténa tvořená CRLH vedením. Důraz je kladen na ověření získaných poznatků o CRLH struktuře dle literatury [1]. Návrh tedy vychází ze struktury uvedené v [1] viz *Obr. 4.1*. Pro napájení antény bude použito mikropáskové vedení s kapacitní vazbou.



Obr. 4.1 Anténa složená z N buněk CRLH vedení (vlevo) [1].
Pohled shora na dvě buňky CRLH vedení (vpravo).

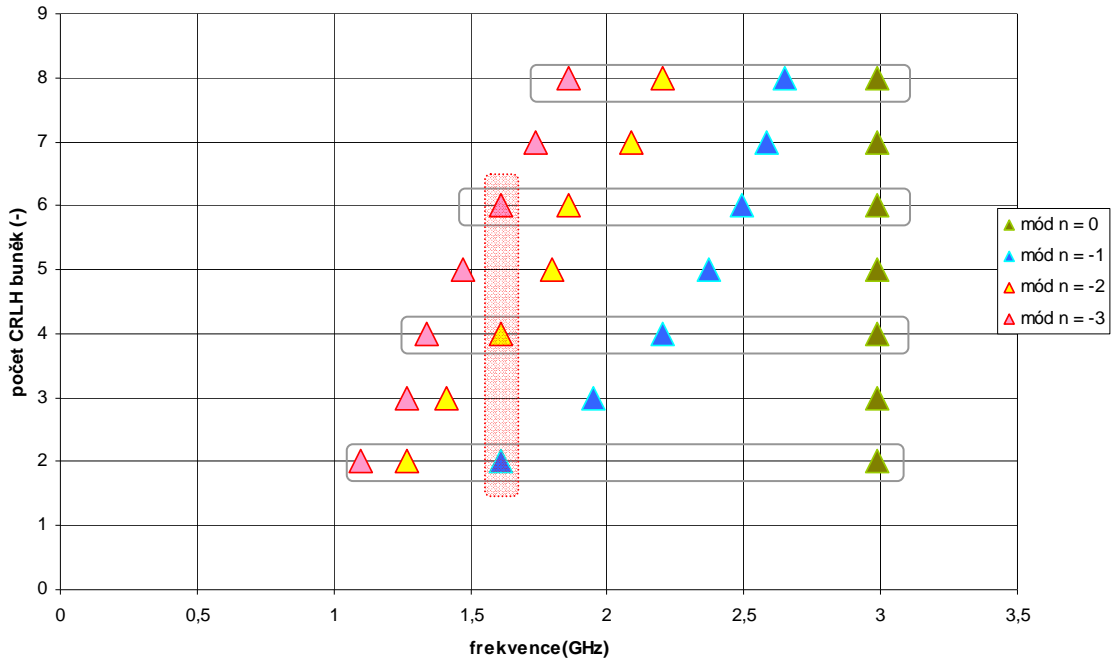
Flíčková anténa je určena délkou $L = 7,3$ mm a šířkou $W = 15$ mm a poloměrem pokovené díry $r = 0,12$ mm. Napájení je definováno délkou páskového vedení $w_1 = 15$ mm, šířkou páskového $w_3 = 1,54$ mm a vazební šterbinou mezi anténním prvkem a napájecím mikropáskem $w_2 = 0,2$ mm. Vzdálenost mezi jednotlivými flíčky je $w_4 = 0,2$ mm. Pro CRLH vedení tvořené 4 buňkami jsou pravotočivé vlastnosti vedení určeny indukčností $L_R' = 1$ nH a kapacitou $C_R' = 1,45$ pF. Levotočivé vlastnosti vedení jsou popsány kapacitou $C_L' = 1,50$ pF a indukčností $L_L' = 1,95$ nH. Uvedené číselné rozměry byly převzaty z [1] pro substrát Duroid 5880 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,2$ a výškou $h = 1,57$ mm.

Rezonanční kmitočet nultého módu CRLH vedení (4 buňky) je $\omega_0 = 2,99$ GHz (dle 3.13) a první záporný mód ($n = -1$) rezonuje na kmitočtu $\omega_{-1} = 2,20$ GHz (3.16). Druhý záporný mód se uplatní na frekvenci $\omega_{-2} = 1,61$ GHz (3.16). V tabulce *Tab. 4.1* je řešena rovnice (3.16) pro určitý mód a počet CRLH buněk. Grafické znázornění hodnot je na *Obr. 4.2*.

Tab. 4.1 Rezonanční kmitočty CRLH vedení pro daný mód a počet buněk.

Mód [-]	Počet buněk N [-]	2	4	6	8
$n = 0$	f [GHz]	2,99	2,99	2,99	2,99
$n = -1$	f [GHz]	1,61	2,20	2,49	2,65
$n = -2$	f [GHz]	1,27	1,61	1,86	2,20
$n = -3$	f [GHz]	1,10	1,34	1,61	1,86

Rezonanční kmitočty pro dané módy jsou určeny celkovým počtem buněk CRLH vedení. Na *Obr. 4.2* je přehledně zobrazen posun rezonačního kmitočtu. Např. pro strukturu tvořenou 2 CRLH buňkami je první záporný mód ($n = -1$) vybudzen na kmitočtu 1,61 GHz: Pro 4 CRLH buňky je rezonance prvního záporného módu ($n = -1$) na frekvenci 2,20 GHz. Červeně jsou vyznačeny stejné rezonanční kmitočty při různém počtu buněk a typu módu. Platí jen pro sudý počet. Proto jsou dále v práci uváděny dvojice buněk.



Obr. 4.2 Rozložení rezonančních kmitočtů CRLH vedení pro daný mód pro různý počet CRLH buněk.

4.1 Modely antén v programu CST MWS

K získání činitele odrazu s_{11} a vyzařovací charakteristiky navržené antény v kapitole 4 je použit program CST Microwave Studio (CST MWS) [10], který umožňuje vytvářet trojrozměrné (3D) modely antén. CST MWS využívá k řešení Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru metodu konečných diferencí v časové oblasti (FD-TD). Z vypočteného rozložení elektromagnetického pole CST MWS dokáže vyčíslit zisk antény, rozptylové parametry, směrové charakteristiky a další.

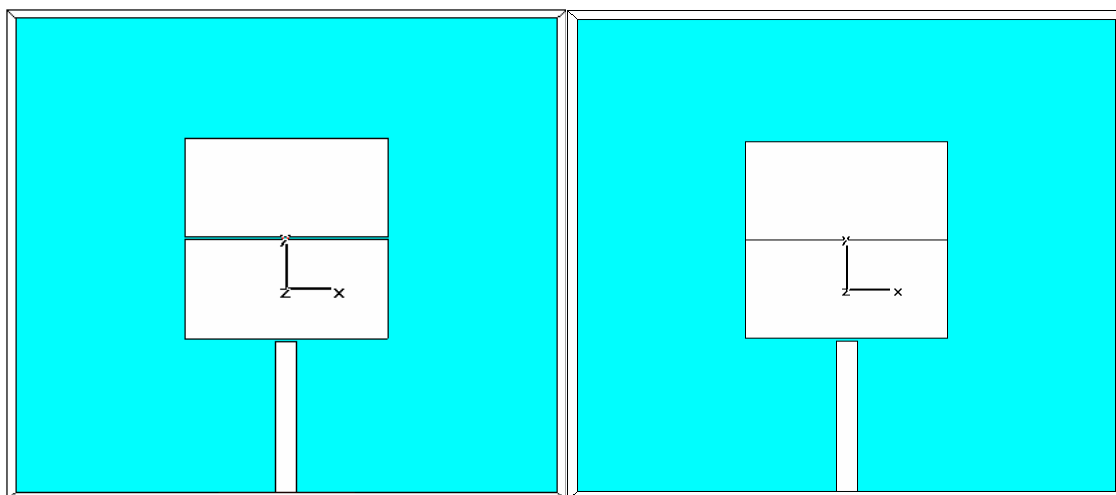
Modely antén v této kapitole jsou zhotoveny na substrátu Duroid 5880 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,2$ a výškou $h = 1,57$ mm.

4.1.1 CRLH anténa

Číselné rozměry modelu antény uvedené v kapitole 4, jsem pro model v programu CST MWS pozměnil za účelem dosažení optimálních vlastností antény. Význam jednotlivých parametrů modelu antény je znázorněn na *Obr. 4.1* a vysvětlen v textu v tabulce *Tab. 4.2*.

4.1.2 Anténa s indukčně vázaným vedením

Anténa s indukčně vázaným vedením se liší od rezonanční antény absencí mezery mezi flíčky ($w_4 = 0$). Tato mezera představovala kapacitu C_L' . Protože C_L' v anténním prvku chybí, nedochází ke vzniku levotočivého efektu a vzniku záporných materiálových konstant. Dochází zde ke stavu, kdy je konstanta šíření k nulová pro nenulovou frekvenci. Tento jev nazýváme nekonečná rezonance a značíme ji jako nultý mód ($n = 0$). Je to vlastně rozhraní mezi levotočivými a pravotočivými vlastnostmi vedení. Layout modelu antény je uveden na *Obr. 4.3*.



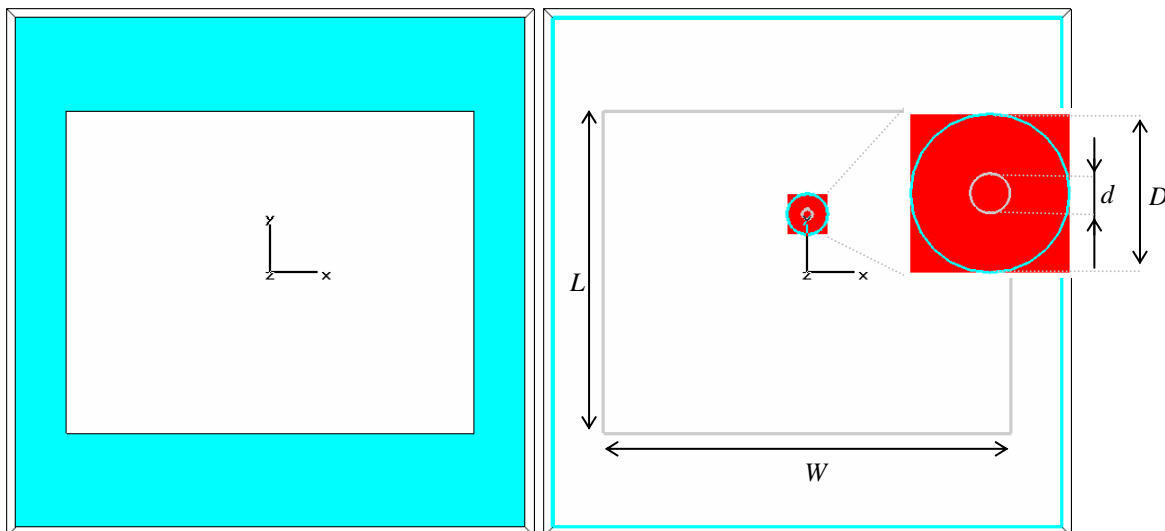
Obr. 4.3 Layout modelu antény v programu CST MWS,
CRLH anténa (vlevo), anténa s induktivně vázaným vedením (vpravo).

Tab. 4.2 Parametry modelu CRLH antény v programu CST MWS.

Parametr	Hodnota [mm]
L délka flíčku	7,30
W šířka flíčku	15,00
t výška pokovení	0,02
h výška substrátu	1,57
r průměr pokovené díry	0,25
w_1 délka napájení	15,00
w_2 mezera mezi flíčkem a napájením	0,20
w_3 šířka napájecího vedení	1,54
w_4 mezera mezi flíčky	0,20
rozměr celé desky	40 × 40

4.1.3 Flíčková anténa

Abychom byli schopni určit výhody a nevýhody planárních antén z metamateriálů, je vytvořen referenční model konvenční flíčkové antény, která je napájena koaxiální sondou (Obr. 4.4). Anténa je navržena dle [5].



Obr. 4.4 Model konvenční flíčkové antény napájené koaxiální sondou v programu CST MWS.

V Tab. 4.3 jsou uvedeny parametry modelu flíčkové antény v programu CST MWS. Význam parametrů uvedených v tabulce je slovně okomentován a vychází z Obr. 4.4.

Tab. 4.3 Parametry modelu konvenční flíčkové antény v programu CST MWS.

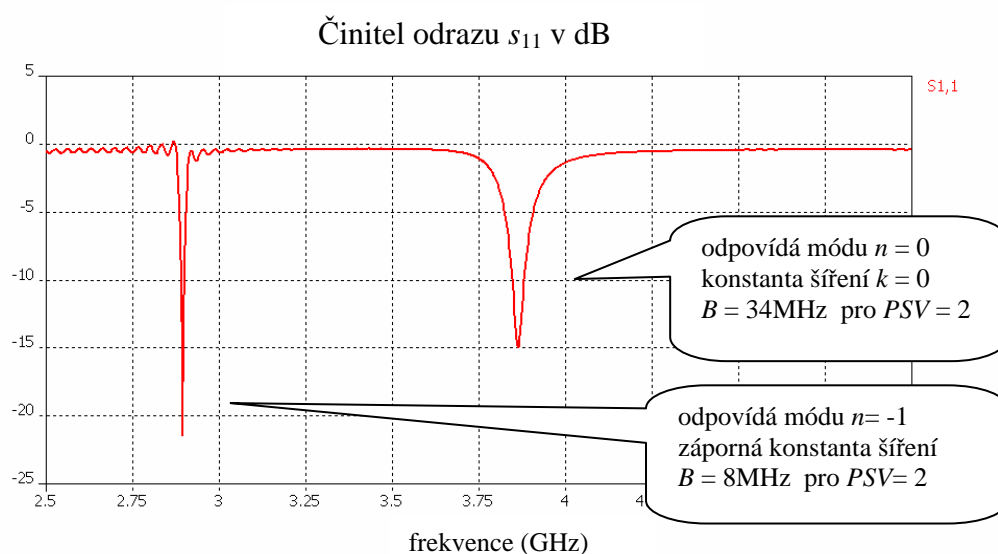
Parametr	Hodnota [mm]
D vnější průměr sondy	2,00
L délka flíčku	31,60
W šířka flíčku	40,00
X vodorovná souřadnice napájení	0,00
Y svislá souřadnice napájení	5,70
d vnitřní průměr sondy	0,50
h výška substrátu	1,57
t výška pokovení	0,02
rozměr celé desky	50 × 50

4.2 Výsledky simulace

Tato podkapitola je zaměřena na vzájemné srovnání výsledků simulací výše uvedených antén. V simulacích jsem se zaměřil na činitel odrazu s_{11} a vyzařovací charakteristiky antény. V poslední části je zobrazeno rozložení proudu na anténním zářiči a srovnání s výsledky uvedenými v[1].

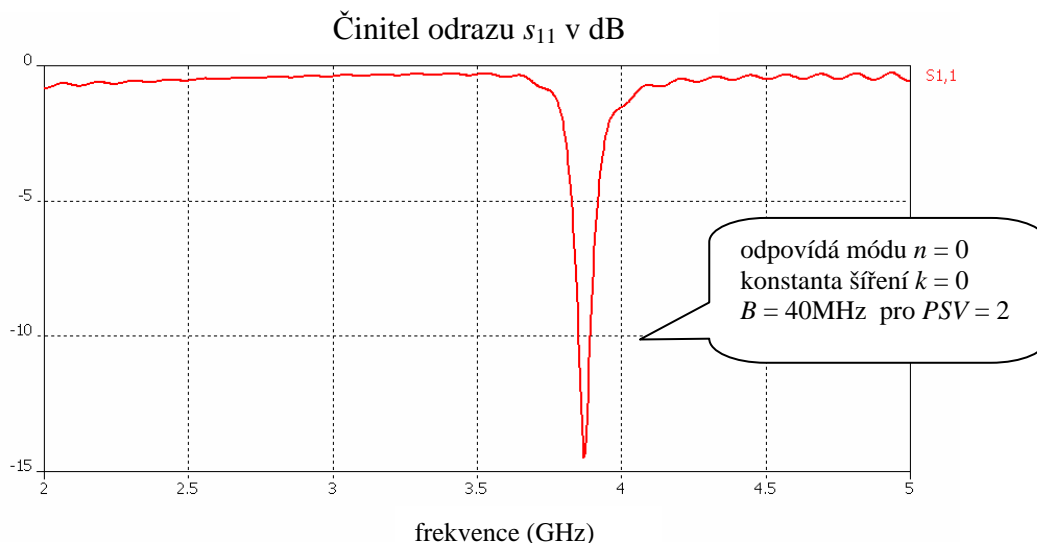
4.2.1 Činitel odrazu s_{11}

Na Obr. 4.5 je průběh činitele odrazu antény tvořené 2 CRLH buňkami. Jsou zde patrná dvě minima, jedno odpovídá módu $n = 0$ (konstanta šíření k je nulová), druhé odpovídá módu $n = -1$ (konstanta šíření je záporná, což odpovídá zpětné vlně).



Obr. 4.5 Činitel odrazu CRLH antény.

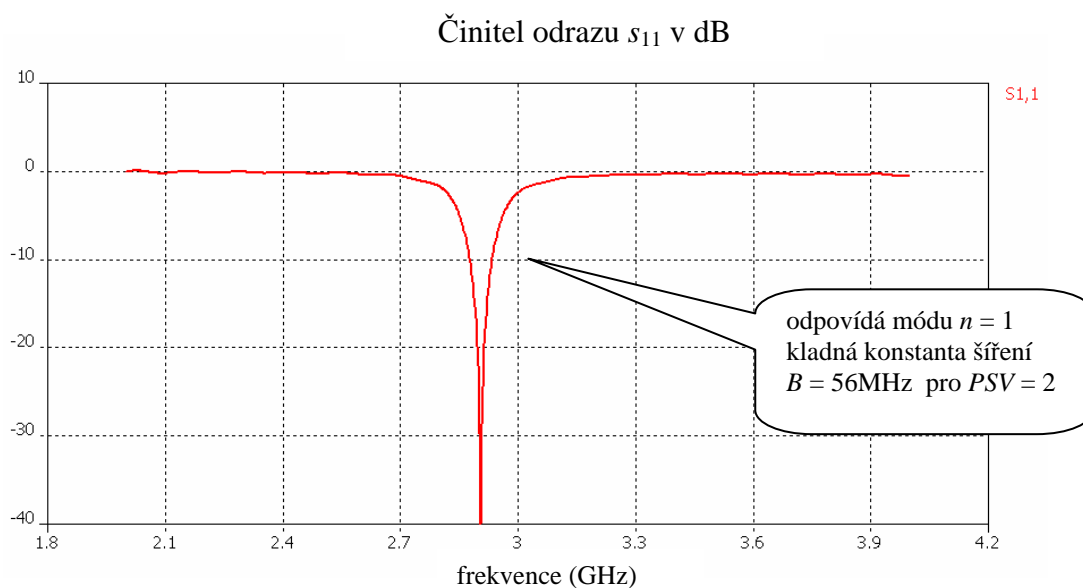
Na Obr. 4.6 je vykreslen průběh činitele odrazu antény s indukčně vázaným vedením.



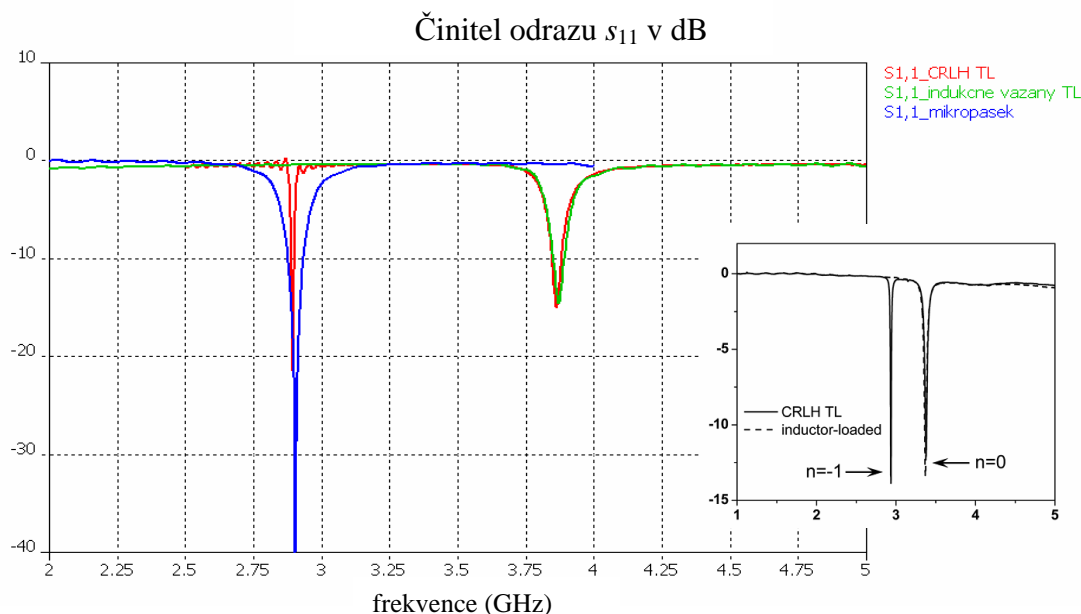
Obr. 4.6 Činitel odrazu antény s indukčně vázaným vedením.

Průběh činitele odrazu na *Obr. 4.7* patří konvenční flíčkové anténě, která rezonuje vlivem pravotočivých vlastností vedení na frekvenci 2,9 GHz. Anténa pracuje v prvním kladném módu ($n = 1$).

Na *Obr. 4.8* je zobrazen činitel odrazu pro všechny tři navržené antény. Nejprve se zaměříme na CRLH anténu. Je patrné, že v okolí 3,8 GHz a 2,9 GHz dochází k rezonanci. Rezonance na frekvenci 2,9 GHz je určena kapacitní reaktancí C_L' a induktivní reaktancí L_L' . Naopak rezonance v okolí 3,8 GHz je určena jak levo- tak pravotočivými vlastnostmi vedení. V případě antény s indukčně vázaným vedením k rezonanci v okolí 2,9 GHz již nedochází. To je způsobeno tím, že jsme z modelu odstranili kapacitní reaktanci C_L' .



Obr. 4.7 Činitel odrazu konvenční flíčkové antény.



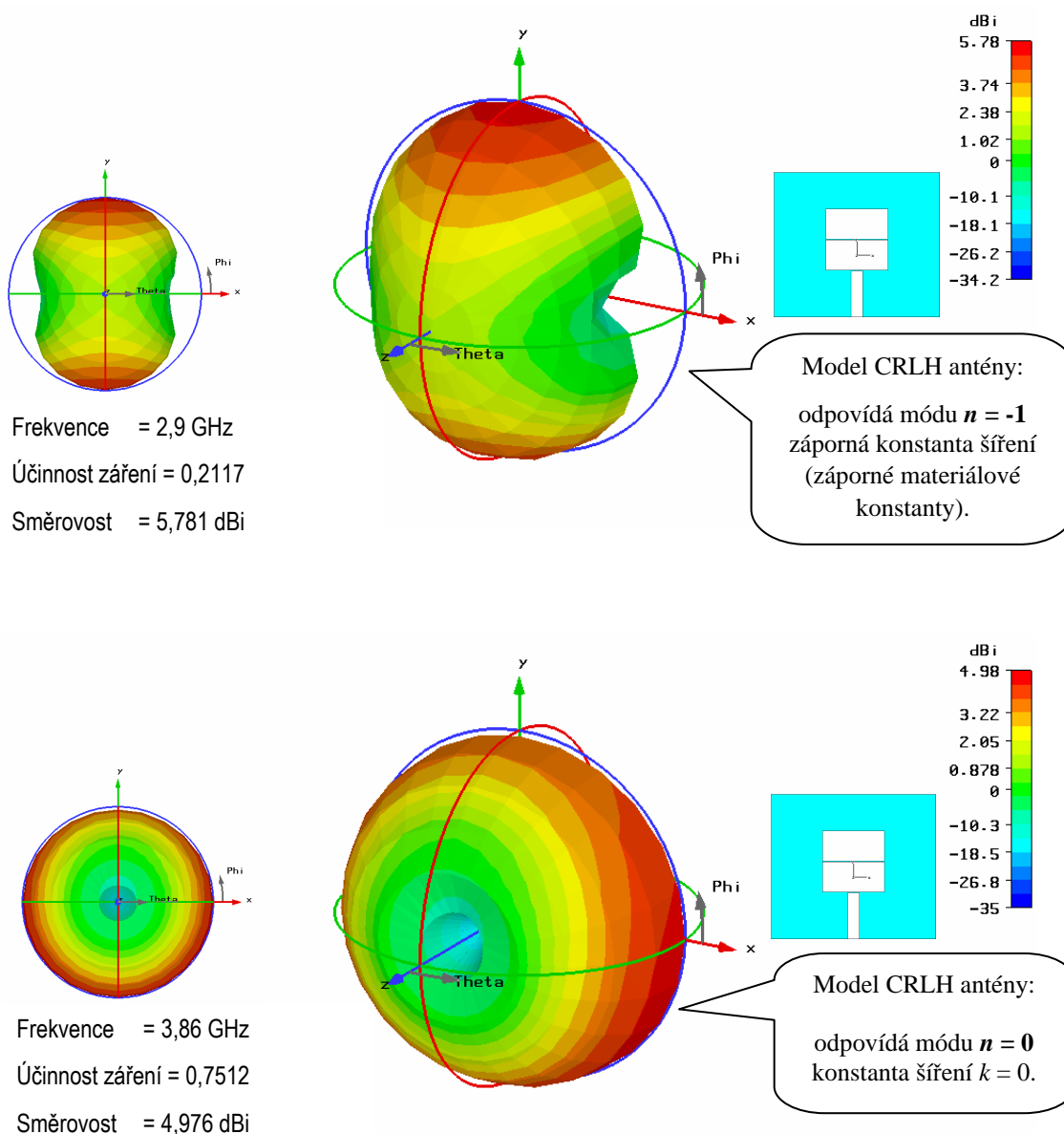
Obr. 4.8 Činitel odrazu pro všechny tři modely antén.
Porovnání s průběhy z článku [1] vpravo.

4.2.2 Vyzařovací charakteristika

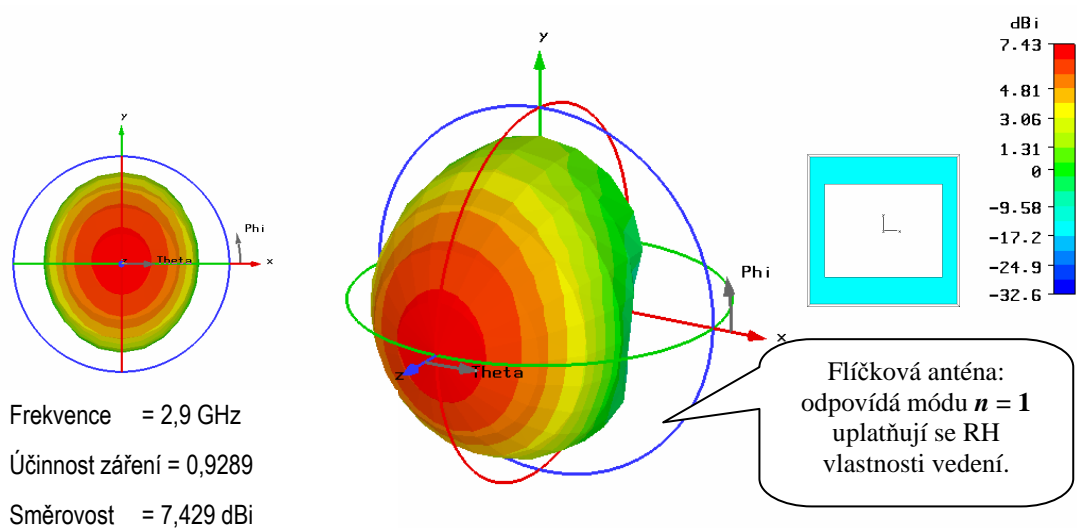
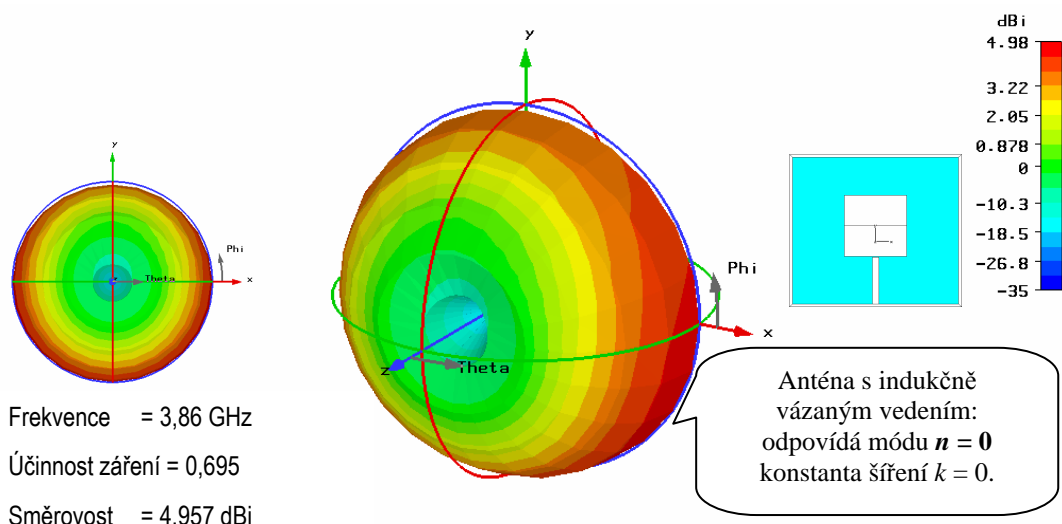
Na Obr. 4.9 jsou zobrazeny vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro dvě rezonanční frekvence. Model CRLH antény pro frekvenci 2,9 GHz vyzařuje do roviny substrátu (dva hlavní laloky). Anténa pracuje v módu $n = -1$, kdy se materiál chová, jako by měl záporné materiálové konstanty.

Na frekvenci 3,86 GHz se anténa chová jako monopól. Nesymetrie charakteristiky je způsobená parazitním vyzařováním napájecího mikropásku. V tomto ohledu mikropásková anténa dosahuje nejlepších parametrů. Dále je třeba vzít v úvahu, že účinnost CRLH antény lze zvýšit přidáním dalších buněk.

Vyzařovací charakteristiky antény s indukčně vázaným vedením a konvenční flíčkové antény jsou zobrazeny na Obr. 4.10.



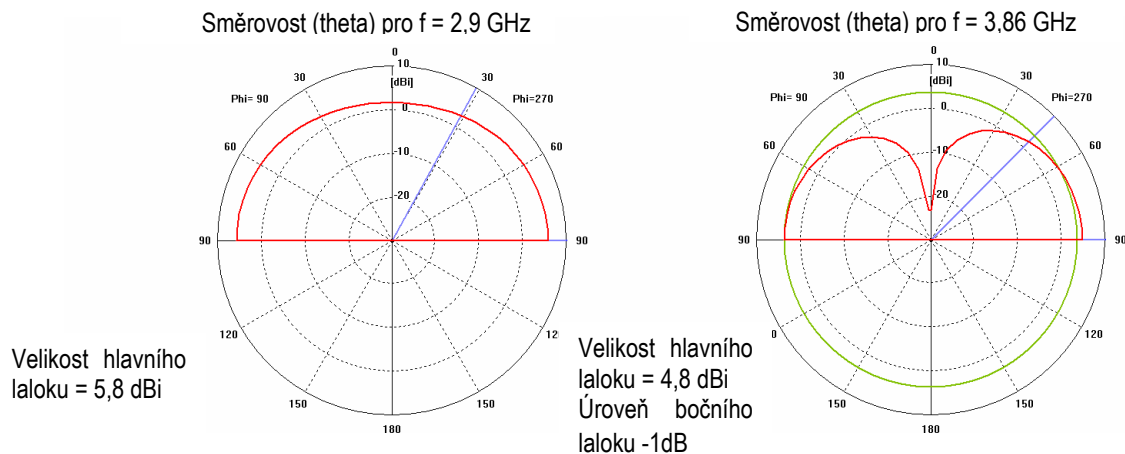
Obr. 4.9 Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pracující ve dvou módech.



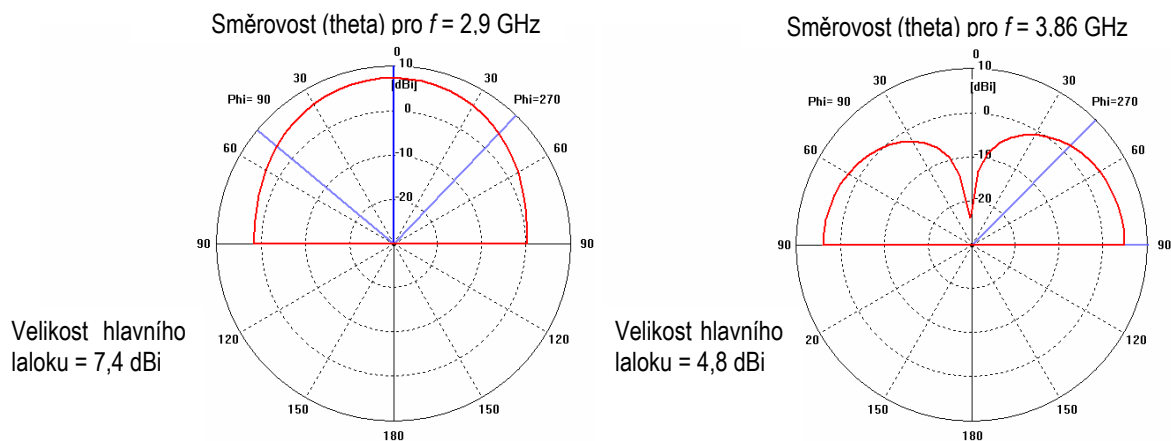
Obr. 4.10 Vyzařovací charakteristiky antény s indukčně vázaným vedením (nahore) a konvenční flíčkové antény (dole).

Na Obr. 4.11 jsou zobrazeny dvojrozměrné směrové charakteristiky CRLH antény pro dvě frekvence, z nichž každá odpovídá jinému módu antény. Hlavní lalok směrové charakteristiky CRLH antény je mimo rovinu substrátu při $f = 2,9$ GHz.

Dvojrozměrná charakteristika směrovosti pro konvenční flíčkovou anténu a anténu s indukčně vázaným vedením je zobrazena v Obr. 4.12. Z průběhu je patrné, že flíčková anténa má jen jeden hlavní lalok mimo rovinu substrátu.



Obr. 4.11 Dvojrozměrné směrové charakteristiky CRLH antény pro úhel $\varphi = 90^\circ$ pro dva módy (vlevo $n = 0$, vpravo $n = -1$).

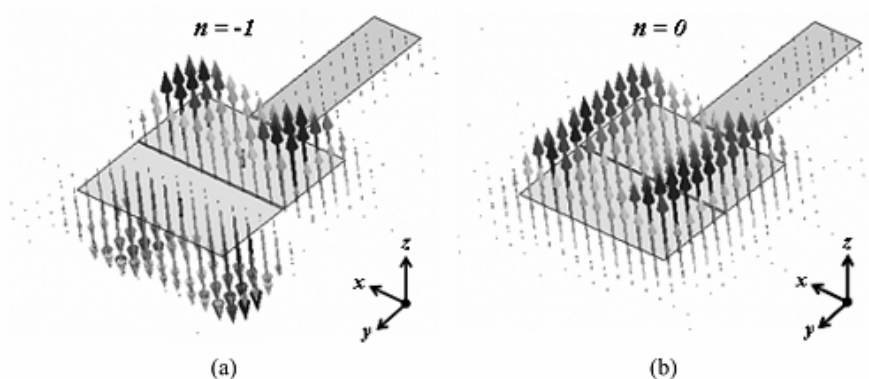


Obr. 4.12 Dvojrozměrné směrové charakteristiky antén pro úhel $\varphi = 90^\circ$.
Vlevo konvenční flíčková anténa.
Vpravo anténa s indukčně vázaným vedením.

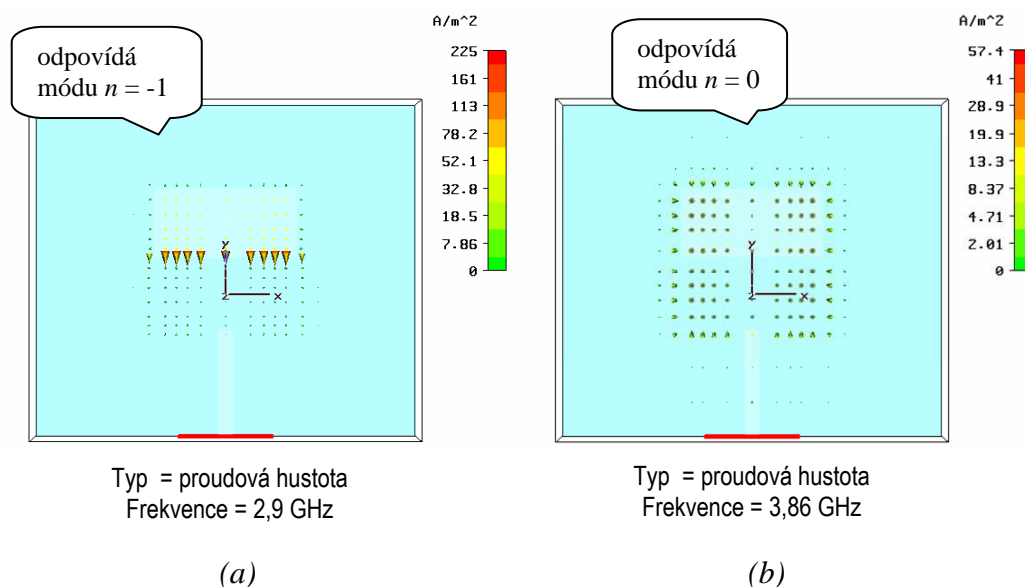
4.2.3 Proudové rozložení

Rozložení proudové hustoty na anténním prvku počítáme jen pro porovnání s výsledky uvedenými v literatuře[1].

Při srovnání vektorů proudové hustoty na *Obr. 4.13* a *Obr. 4.14* je patrné, že vektory mají stejný směr i rozložení. Tím jsme ověřili realizovatelnost monopólu, který má nekonečnou vlnovou délku. Dále jsme ověřili realizovatelnost záporných hodnot materiálových konstant. Anténa pracuje ve dvou módech právě díky vlastnostem navržené struktury, kde se uplatňují levo- a pravotočivé vlastnosti vedení.



Obr. 4.13 Rozložení proudové hustoty u dvou buněk CRLH antény [1]:
a) půlvlnný režim (odpovídá módu $n = -1$), b) nekonečná vlnová délka (režim $n = 0$).



Obr. 4.14 Rozložení proudové hustoty u dvou buněk CRLH antény vypočtené v CST MWS: a) půlvlnný režim (odpovídá módu $n = -1$),
b) nekonečná vlnová délka (režim $n = 0$).

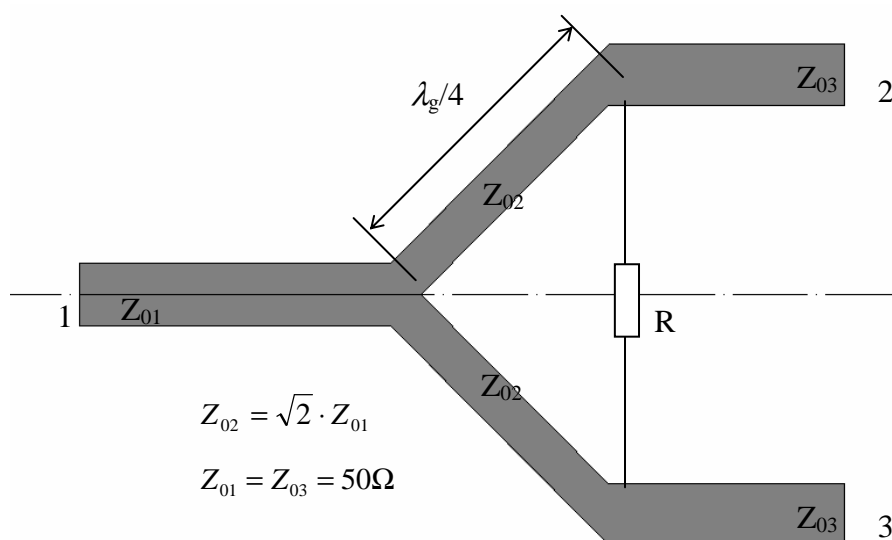
5 NÁVRH WILKINSONOVA 3dB DĚLIČE

Tato kapitola je věnována návrhu a realizaci Wilkinsonovu mikropáskovému 3dB děliči výkonu (WDV). Jedná se o dělič s rovnoměrným dělením výkonu. Realizace na substrátu Arlon25N ($\epsilon_r = 3,38$, $h = 1,54$ mm, $t = 0,02$ mm). Dělič bude pracovat na frekvenci $f_0 = 5,4$ GHz. Informace jsou čerpány z [6]. Zhotovený dělič nám umožní napájet dvě řady CRLH buněk.

5.1 Teoretický rozbor

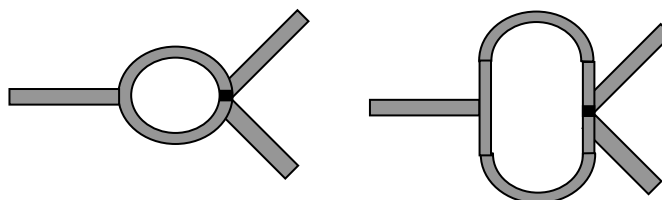
Na Obr. 5.1 je zobrazen mikropáskový dělič výkonu. Rovnoměrné rozložení vstupního výkonu na výstupní brány je splněno symetrií obvodu. Při buzení vstupní brány je na výstupních branách stejné napětí i fáze (odporem R neteče žádný proud). Rezistor R plní funkci při odrazech na branách 2 a 3. Dojde-li k odrazu na bráně 2(3), šíří se odražený signál přes odpor R a také přes dva čtvrtvlnné úseky Z_{02} . Oba signály se setkají v protifázi, čímž se vyruší. Samozřejmostí je impedanční přizpůsobení všech bran děliče.

Aby dělič výkonu pracoval správně, nesmí mezi oběma mikropáskami čtvrtvlnných transformátorů Z_{02} existovat elektromagnetická vazba. Rezistor R se musí chovat jako prvek se soustředěnými parametry na pracovním kmitočtu a musí mít zanedbatelnou délku vůči délce vlny. Možné realizace děliče výkonu jsou zobrazeny na Obr. 5.2.



Obr. 5.1 Principální zapojení děliče výkonu.

Vedení Z_{01} představuje vstupní mikropásek s charakteristickou impedancí 50Ω . Aby byla impedančně přizpůsobená vstupní brána musí mít vedení Z_{02} charakteristickou impedancí $Z_{02} = \sqrt{2} \cdot Z_{01} = \sqrt{2} \cdot 50 = 70,7\Omega$ a čtvrtvlnnou délku vlny pracovního kmitočtu $\lambda_g/4$. Potom vedení Z_{02} představuje čtvrtvlnné transformační vedení. Vedení Z_{03} představuje další čtvrtvlnný úsek o charakteristické impedanci 50Ω . Vedení Z_{04} je pomocné vedení pro umístění středního vodiče SMA konektoru.



Obr. 5.2 Možné způsoby realizace děliče výkonu.

5.1.1 Syntéza vedení Z_{01}

Na základě požadované charakteristické impedance vedení jsou vypočtena odpovídající šířka mikropásku s ohledem na nenulovou tloušťku pásků. Disperzi zanedbáme.

Ze zadané charakteristické impedance $Z_{01} = 50\Omega$ určíme šířku vedení w' .

Hammerstad, široké vedení $w'/h \geq 1$ [6]:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_{01}\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3,38}} = \underline{\underline{6,4420}},$$

$$\frac{w'}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \cdot \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} =$$

$$\frac{w'}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ 6,442 - 1 - \ln(2 \cdot 6,442 - 1) + \frac{3,38 - 1}{2 \cdot 3,38} \cdot \left[\ln(6,442 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{3,38} \right] \right\} = \underline{\underline{3,5688mm}}.$$

Při uvažování nenulové tloušťky horních pásků je hodnota korekce[6]

$$\Delta w' = 1,25 \frac{t}{\pi\sqrt{\epsilon_r}} \left(\ln \frac{2h}{t} + 1 \right) = 1,25 \frac{0,03 \cdot 10^{-3}}{\pi\sqrt{3,38}} \left(\ln \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}}{0,03 \cdot 10^{-3}} + 1 \right) = \underline{\underline{1,4656 \cdot 10^{-2} mm}}.$$

Potom skutečná šířka horního pásku, která bude realizována, je

$$w' = w_s + \Delta w' \Rightarrow w_s = w' - \Delta w' = 3,5688 - 1,4656 \cdot 10^{-2} = \underline{\underline{3,5512mm}}.$$

Efektivní šířka vedení w'_{ef} je dána vztahem :

Wheller, široké vedení $w/h \geq 1$ [6]:

$$w'_{ef} = w' + \frac{2h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right] =$$

$$= 3,5688 \cdot 10^{-3} + \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{3,5688 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right] = \underline{\underline{7,0314 \text{ mm}}}.$$

Efektivní permitivita $\epsilon'_{r,ef}$ je rovna:

Wheller, široké vedení $w/h \geq 1$ [6]:

$$\epsilon'_{r,ef} = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right]}{\frac{w'}{h} + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right]} =$$

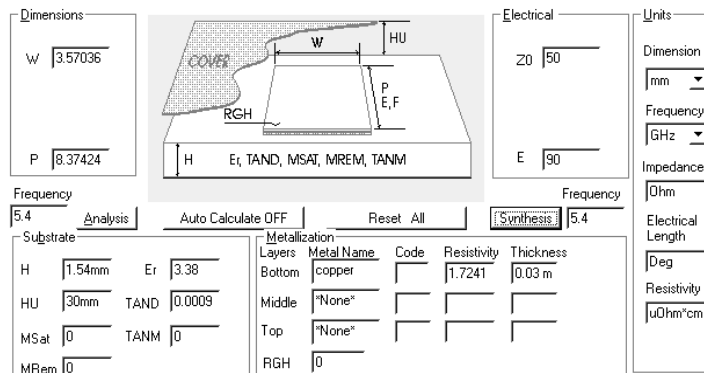
$$= 3,38 - \frac{3,38 - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \cdot \left(\frac{3,5688 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right]}{\frac{3,5688 \cdot 10^{-3}}{1,54 \cdot 10^{-3}} + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{3,5688 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right]} = \underline{\underline{2,7195}}.$$

Délka vedení potom bude $\lambda_{g1} / 4 = \frac{c}{4 \cdot f \sqrt{\epsilon'_{r,ef}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 5,4 \cdot 10^8 \sqrt{2,7195}} = \underline{\underline{8,4222 \text{ mm}}}.$

Pro ověření charakteristické impedance [6]

$$Z_{01} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon'_{r,ef}}} \frac{h}{w'_{ef}} = \frac{120\pi}{\sqrt{2,7195}} \frac{1,54 \cdot 10^{-3}}{7,0314 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{50,0693 \Omega}}.$$

Správnost výpočtu je ověřena pomocí utility v programu Ansoft Designer SV (viz Obr. 5.3)



Obr. 5.3 Ověření správnosti výpočtu pomocí programu Ansoft Designer.

$$Z_{01} = 50,0 \Omega$$

5.1.2 Syntéza vedení Z_{02}

Tento postup opakujeme pro zadanou hodnotu charakteristické impedance $Z_{02} = 70,7 \Omega$.

Určíme šířku vedení w' :

Hammerstad, široké vedení $w'/h \geq 1$ [6]:

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_{01}\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{60\pi^2}{70,7\sqrt{3,38}} = 4,5559,$$

$$\frac{w'}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \cdot \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} =$$

$$\frac{w'}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ 4,5559 - 1 - \ln(2 \cdot 4,5559 - 1) + \frac{3,38 - 1}{2 \cdot 3,38} \cdot \left[\ln(4,55 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{3,38} \right] \right\} = \underline{\underline{1,9441 mm}}.$$

Při uvažování nenulové tloušťky horních pásků určíme korekci

Wheller, široké vedení $w'/h \geq 1$ [6]:

$$\Delta w' = 1,25 \frac{t}{\pi\sqrt{\epsilon_r}} \left(\ln \frac{2h}{t} + 1 \right) = 1,25 \frac{0,03 \cdot 10^{-3}}{\pi\sqrt{3,38}} \left(\ln \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}}{0,03 \cdot 10^{-3}} + 1 \right) = \underline{\underline{1,4656 \cdot 10^{-2} mm}}.$$

Potom skutečná šířka horního pásku, kterou budeme realizovat, bude

$$w' = w_s + \Delta w' \Rightarrow w_s = w' - \Delta w' = 1,9441 - 1,4656 \cdot 10^{-2} = \underline{\underline{1,9295 mm}}.$$

Efektivní šířka vedení w'_{ef} je dána následujícím vztahem .

Wheller, široké vedení $w'/h \geq 1$ [6]:

$$w'_{ef} = w' + \frac{2h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right] =$$

$$= 1,9441 \cdot 10^{-3} + \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{1,9441 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right] = \underline{\underline{5,1115 mm}}.$$

Efektivní permitivita $\epsilon'_{r,ef}$ je rovna

Wheller, široké vedení $w'/h \geq 1$ [6]:

$$\epsilon'_{r,ef} = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right]}{\frac{w'}{h} + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{w'}{2h} + 0,85 \right) \right]} =$$

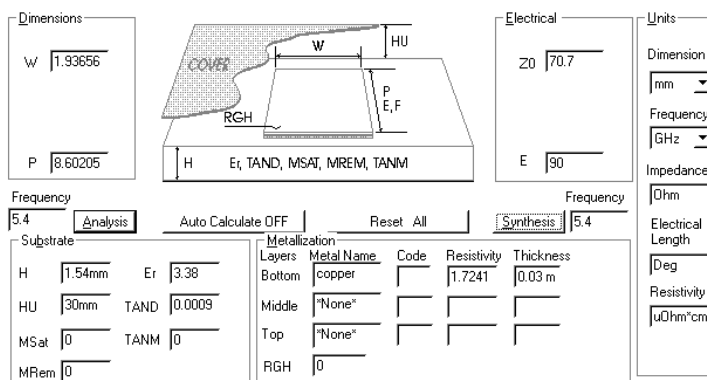
$$= 3,38 - \frac{3,38 - 1}{2} \cdot \frac{\ln \left[6,28 \cdot \left(\frac{1,9441 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right]}{\frac{1,9441 \cdot 10^{-3}}{1,54 \cdot 10^{-3}} + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \cdot \left(\frac{1,9441 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3}} + 0,85 \right) \right]} = \underline{\underline{2,5804}}.$$

Délka vedení potom bude $\lambda_{g2} / 4 = \frac{c}{4 \cdot f \sqrt{\epsilon'_{r,ef}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 5,4 \cdot 10^8 \sqrt{2,5804}} = \underline{\underline{8,6462 \text{ mm}}}$.

Pro ověření charakteristické impedance [6]

$$Z_{02} = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon'_{r,ef}}} \frac{h}{w'_{ef}} = \frac{120\pi}{\sqrt{2,5804}} \frac{1,54 \cdot 10^{-3}}{5,1115 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{70,7061 \Omega}}.$$

Správnost výpočtu je ověřena pomocí utility v programu Ansoft Designer SV (viz Obr. 5.4). V Tab. 5.1 jsou pro přehlednost zobrazeny vypočítané hodnoty.



Obr. 5.4 Ověření správnosti výpočtu pomocí programu Ansoft Designer.

$$Z_{01} = 70,7 \Omega$$

Tab. 5.1 Souhrn výsledků syntézy mikropáskového vedení pro dvě různé charakteristické impedance.

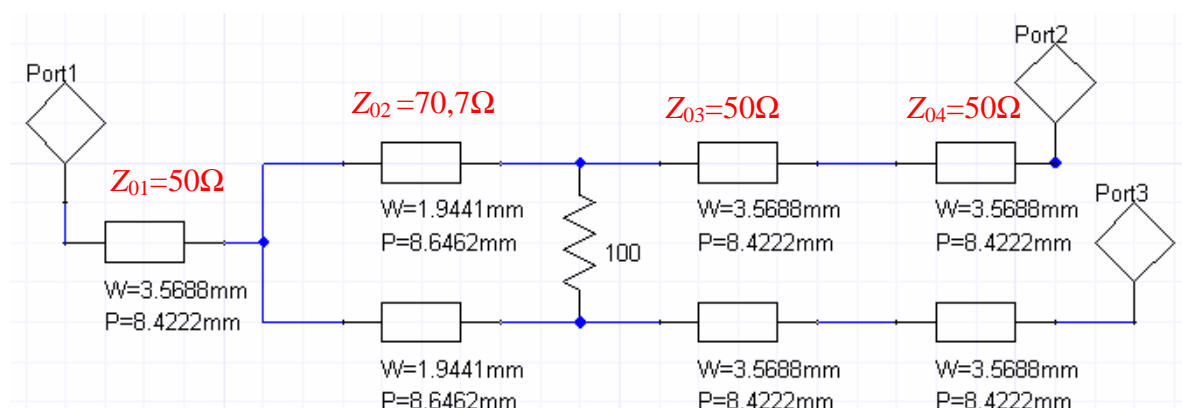
	$Z_{01} = 50,0 \Omega$	$Z_{02} = 70,7 \Omega$
$w' [\text{mm}]$	3,5688	1,9441
$\lambda_{gv} [\text{mm}]$	8,4222	8,6462
$W'_{ef} [\text{mm}]$	7,0314	5,1115
$\epsilon'_{r,ef} [-]$	2,7195	2,5804
$Z_{0v} [\Omega]$	50,0693	70,7061

5.2 Model děliče výkonu

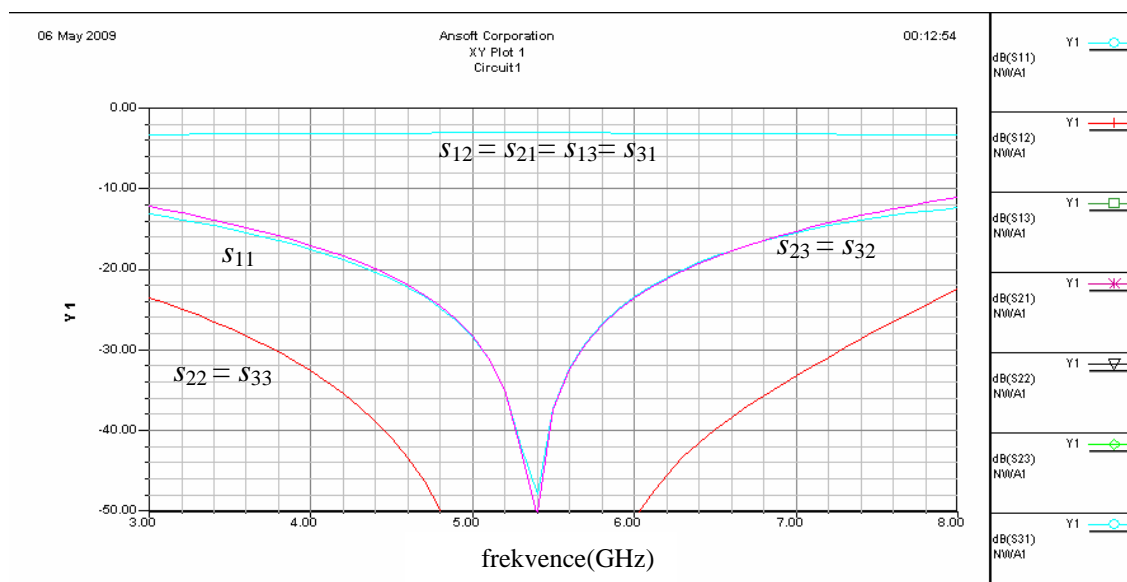
5.2.1 Bloková struktura děliče výkonu

V programu Ansoft Designer je realizován blokově Wilkinsonův dělič výkonu na základě *Obr. 5.1*. Jednotlivé parametry k realizaci vedení jsou uvedeny v *Tab. 5.1*. Výsledná bloková struktura v programu Ansoft je zobrazena na *Obr. 5.5*.

Průběhy rozptylových parametrů navržené struktury jsou vykresleny na *Obr. 5.6*, kde je patrné minimum činitele odrazu s_{11} a přenos mezi vstupní a výstupními branami je 3 dB. Odražený signál na bráně 2(3) neprojde k bráně 3(2). Je dostatečně potlačen.



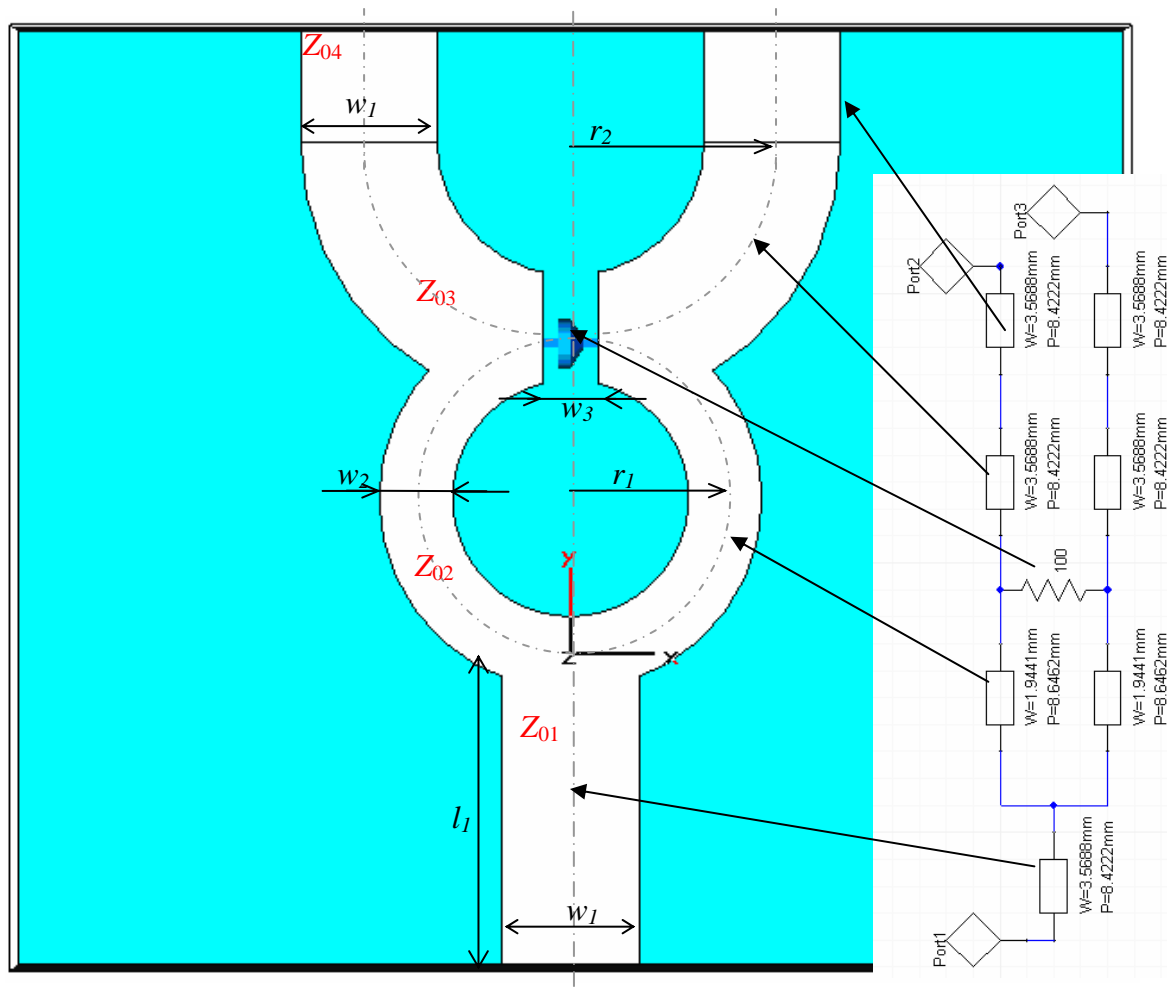
Obr. 5.5 Blokové zapojení přizpůsobeného WDV v programu Ansoft Designer SV.



Obr. 5.6 Výsledné průběhy navrženého děliče v programu Ansoft Designer SV.

5.2.2 Model děliče v programu CST MWS

V programu CST MWS je realizován model WDV. Souvislost jednotlivých částí je zobrazena na Obr. 5.7. Jednotlivé parametry pro návrh děliče jsou uvedeny v Tab. 5.2. Délka vedení Z_{04} nemá vliv na průběhy činitelů odrazu a činitelů přenosu (viz Obr. 5.6), proto je zkrácena na 3 mm.

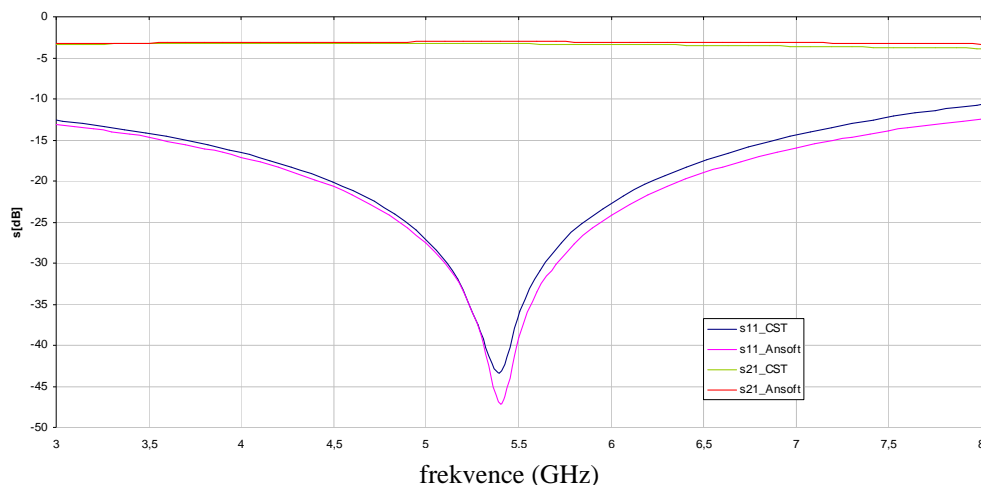


Obr. 5.7 WDV v programu CST MWS(vlevo) a v Ansoft(vpravo)

Tab. 5.2 Parametry modelu CRLH antény v programu CST MWS.

Parametr	Hodnota [mm]
t výška pokovení	0,02
h výška substrátu	1,54
w_1 šířka napájecího vedení	3,42
w_2 šířka napájecího vedení	2,00
w_3 mezera pro SMD odpor	1,40
r_1 poloměr pokovené díry	4,20
r_2 poloměr pokovené díry	5,48
l_1 optimalizovaná délka $\lambda_g/4$ vedení	8,45
l_2 optimalizovaná délka $\lambda_g/4$ vedení	3,00
rozměr celé desky	40 × 30

Výsledky simulace WDV v programu Ansoft Designer SV a CST MWS jsou zobrazeny na Obr. 5.8, kde je patrná shoda obou průběhů. Nejlepšího přizpůsobení je dosažené na požadovaném kmitočtu 5,4 GHz.

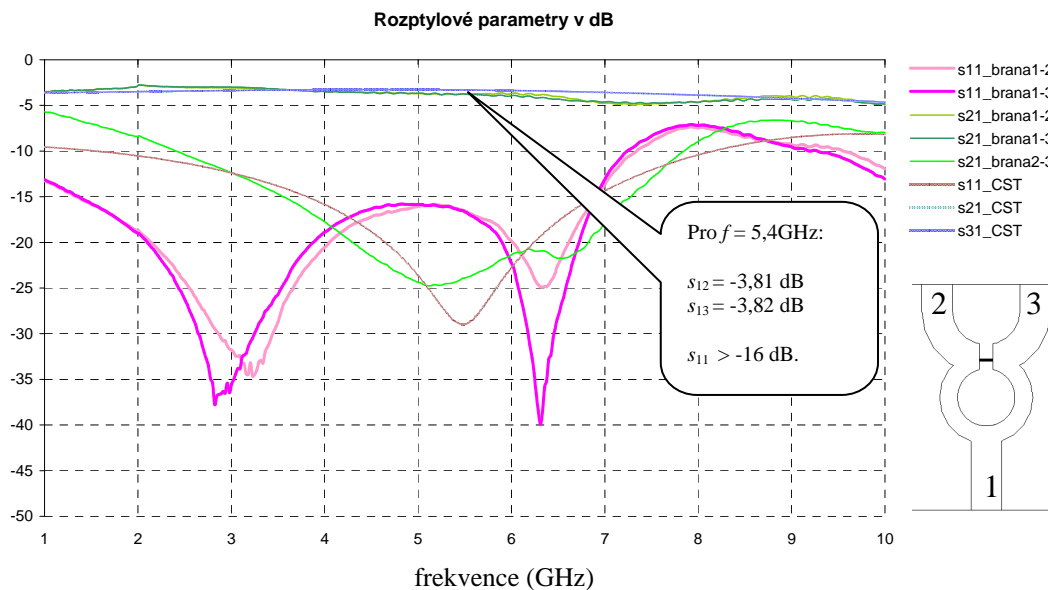


Obr. 5.8 Průběhy s_{11} a s_{21} pro vedení Z_{02} o délce $\lambda_g/4 = 8,37\text{mm}$.
Při zapojení dle Obr. 5.7.

Předloha pro výrobu navrhovaného děliče výkonu je v příloze A. Dělič byl osazen SMA konektory a změřen pomocí skalárního obvodového analyzátoru Anritsu 54147A.

5.3 Výsledky měření děliče výkonu

Srovnání výsledků simulace v programu CST a vyrobeného děliče jsou zobrazeny na Obr. 5.9. Označení jednotlivých bran je vysvětleno v obrázku. Průběh činitele odrazu se od simulace liší, ale pro naši potřebu je dělič dostačující. Dobré impedanční přizpůsobení ($PSV = 2$) je splněno v kmitočtovém rozsahu 1 až 7 GHz.



Obr. 5.9 Srovnání výsledku simulace CST a vyrobeného děliče.

6 CRLH ANTÉNA PRO PÁSMO 5,4 GHz

Tato kapitola je věnována modifikaci antény CRLH pro pásmo 3 GHz (podkapitola 4.1). Jsou zde představeny modely antén skládající se z dvou, čtyř a šesti buněk CRLH vedení v jedné nebo dvou řadách. Bude diskutován vliv počtu buněk na parametry antén. Jedná se o činitel odrazu na vstupní bráně s_{11} , rozložení proudu na anténních prvcích a vyzářovací směrovou charakteristiku. Nakonec bude ukázán vliv prvků, ze kterých se anténa skládá (viz kapitola 3), na kmitočtový průběh činitele odrazu s_{11} .

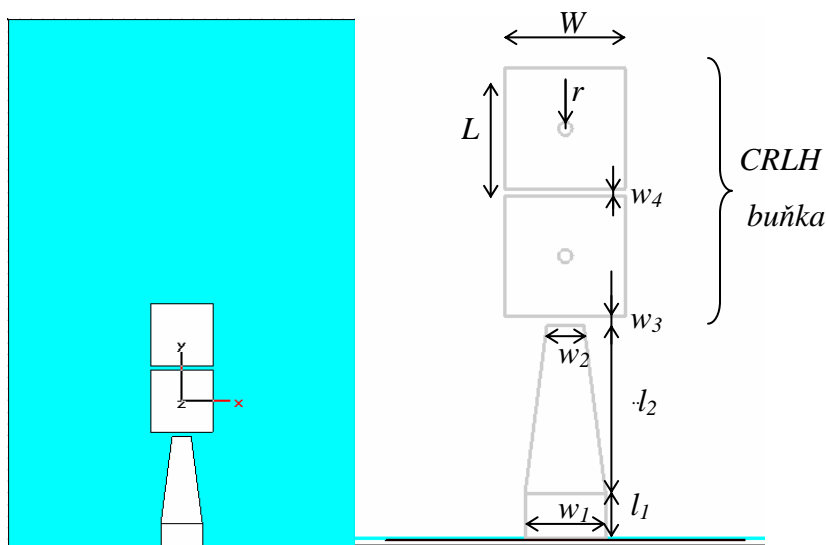
Aby docházelo k rezonanci musí být za sebou spojeny dvě CRLH buňky, jinak by nedošlo k realizaci kapacity C_L' , která tvoří vazbu mezi buňkami. Proto pod pojmem „jedna CRLH buňka“ budeme rozumět dvě buňky za sebou (viz Obr. 6.1).

6.1 Modely antén v CST MWS

Všechny modely antén, které jsou v této kapitole prezentovány, jsou navrženy pro substrát Arlon 25N s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$ a výškou $h = 1,54$ mm. Ztráty v substrátu jsou zanedbány.

6.1.1 CRLH anténa, 1řada buněk

Model antény pro 5,4 GHz vychází z již představené antény (viz podkapitola 4.1). Návrh spočíval v parametrické změně rozměrů antény (změně prvků CRLH vedení), za účelem dosažení záporného módu do okolí 5,4 GHz s nejlepším impedančním přizpůsobením. Výsledná anténa s jednou CRLH buňkou je zobrazena Obr. 6.1. Konečné rozměry antény jsou uvedeny v Tab. 6.1. Tyto hodnoty jsou stejné pro všechny tři modely antén. Antény se liší pouze v počtu buněk. Princip rozšiřování počtu CRLH buněk je naznačen na Obr. 6.2.



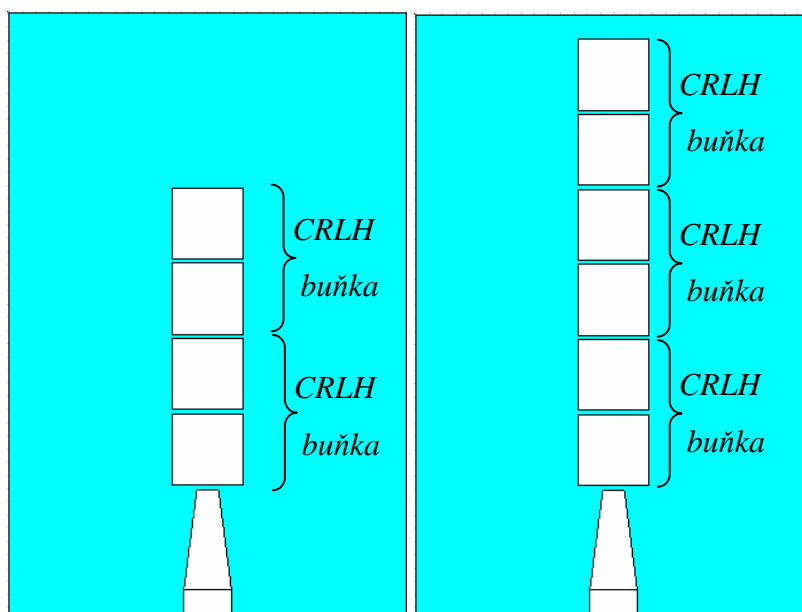
Obr. 6.1 Vlevo layout modelu CRLH antény, vpravo detail jedné buňky CRLH antény.

Optimalizované rozměry modelu antény tvořené jednou CRLH buňkou v programu CST MWS jsou uvedeny v Tab. 6.1. Význam parametrů uvedených v tabulce je slovně okomentován a vychází z Obr. 6.1.

Vedení o délce l_2 představuje čtvrtvlnný transformační úsek, který transformuje vstupní impedanci 50Ω (odpovídá šířce vedení 3,6 mm) na hodnotu 76Ω (šířka vedení 1,65 mm). Protože by se 50Ω napájecí vedení blížilo rozměrům antény.

Tab. 6.1 Parametry upraveného modelu CRLH antény v programu CST MWS pro jednu řadu CRLH buněk.

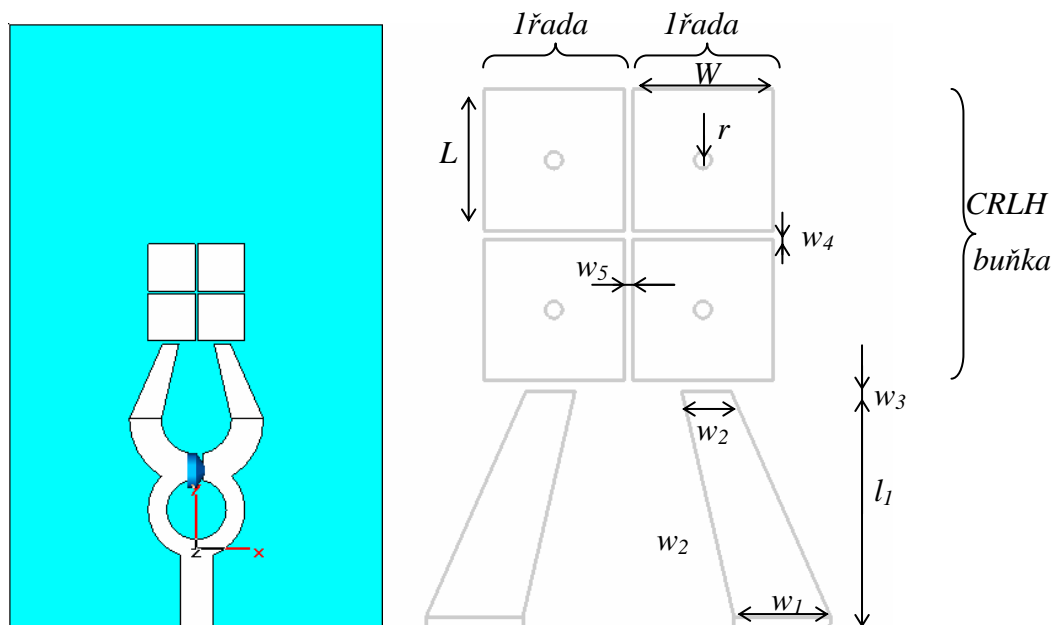
Parametr		Hodnota [mm]
L	délka flíčku	5,40
W	šířka flíčku	5,40
t	výška pokovení	0,02
h	výška substrátu	1,54
r	poloměr pokovené díry	0,30
w_1	šířka napájecího vedení	3,60
w_2	šířka napájecího vedení	1,65
w_3	mezera mezi flíčkem a napájením	0,40
w_4	mezera mezi flíčky	0,30
l_1	délka pomocného vedení pro konektor	2,00
l_2	optimalizovaná délka $\lambda_g/4$ vedení	8,55
rozměr celé desky		30×45



Obr. 6.2 Vlevo layout modelu CRLH antény se dvěma buňkami, vpravo model CRLH antény tvořené třemi buňkami.

6.1.2 CRLH anténa, 2řady buněk

Počet buněk lze rozšiřovat jednak za sebou, ale i vedle sebe. V kapitole č.5 je k tomuto účelu navržen Wilkinsonův mikropáskový dělič výkonu pro pásmo 5,4 GHz. Díky němuž jsou obě řady buněk napájeny stejným signálem a soufázově.

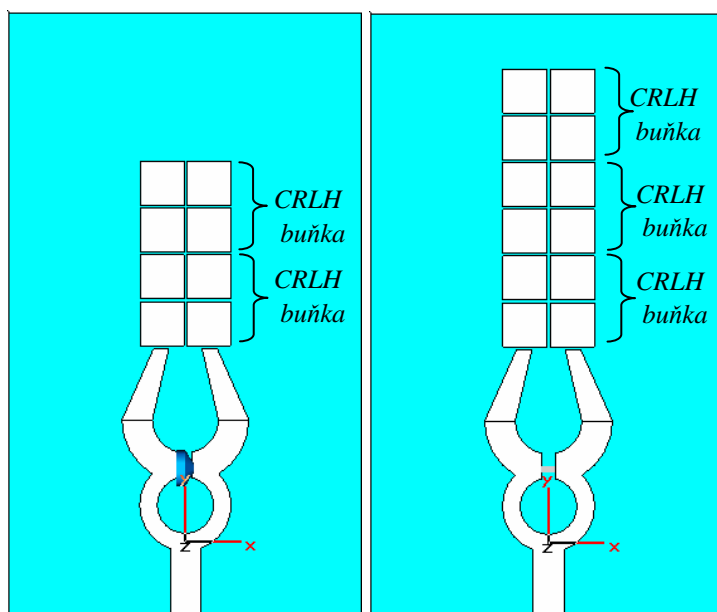


Obr. 6.3 Vlevo layout modelu CRLH antény pro dvě řady buněk, vpravo detail CRLH antény.

Rozměry CRLH buňky jsou totožné jako v předchozím případě a jsou uvedeny v Tab. 6.2. Rozdílný je úsek napájecího vedení. Význam parametrů uvedených v tabulce je slovně okomentován a vychází z Obr. 6.3.

Tab. 6.2 Parametry upraveného modelu CRLH antény v programu CST MWS pro dvě řady CRLH buněk.

Parametr		Hodnota [mm]
L	délka flíčku	5,40
W	šířka flíčku	5,40
t	výška pokovení	0,02
h	výška substrátu	1,54
r	poloměr pokovené díry	0,30
w_1	šířka napájecího vedení	3,60
w_2	šířka napájecího vedení	1,65
w_3	mezera mezi flíčkem a napájením	0,40
w_4	mezera mezi flíčky ve směru X	0,30
w_5	mezera mezi flíčky ve směru Y	0,30
l_1	optimalizovaná délka $\lambda_g/4$ vedení	8,00
rozměr celé desky		40 × 69

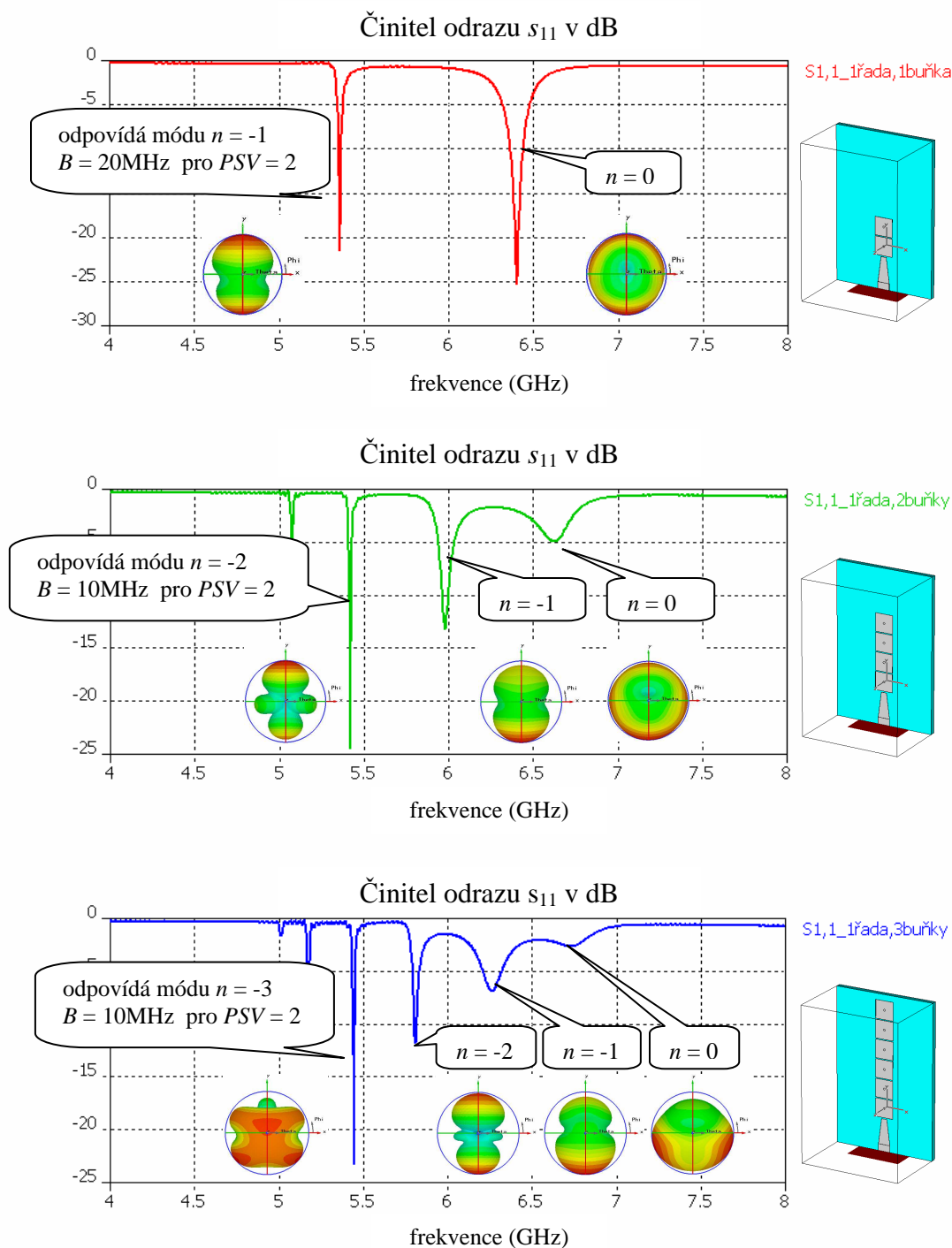


Obr. 6.4 Vlevo layout modelu CRLH antény se dvěmi buňkami a dvěmi řadami, vpravo model CRLH antény tvořené třemi buňkami řadami.

6.2 Simulace antén v programu CST MWS

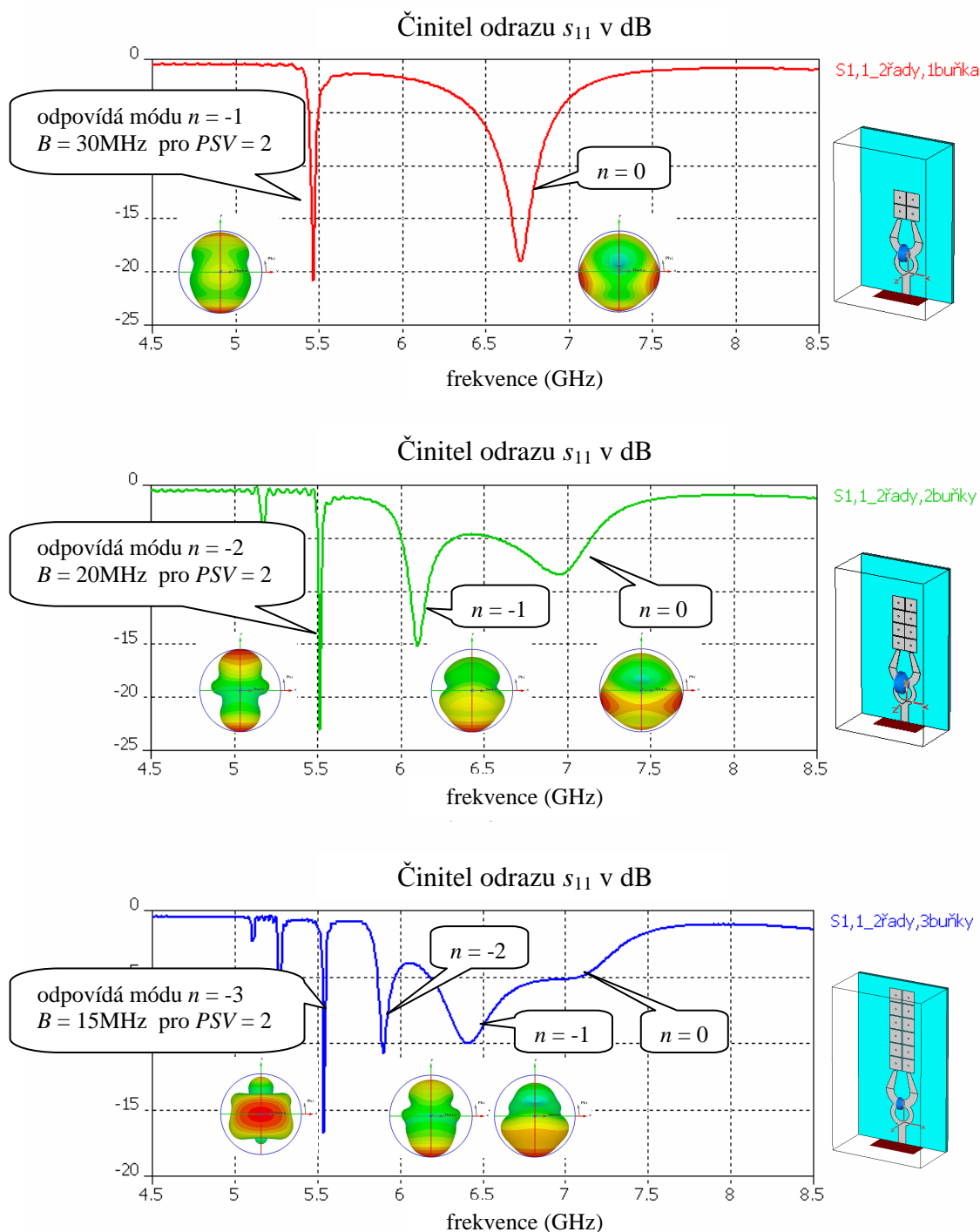
6.2.1 Činitel odrazu

Na Obr. 6.5 jsou vykresleny kmitočtové průběhy činitele odrazu s_{11} pro daný počet CRLH buněk v jedné řadě. Počáteční frekvence 5,4 GHz se s rostoucím počtem buněk mění jen nepatrně. Mění se ale mód na této frekvenci. Jak je patrné z Obr. 6.5 platí pro jednu buňku $n = -1$, pro dvě buňky $n = -2$ a pro tři buňky $n = -3$.



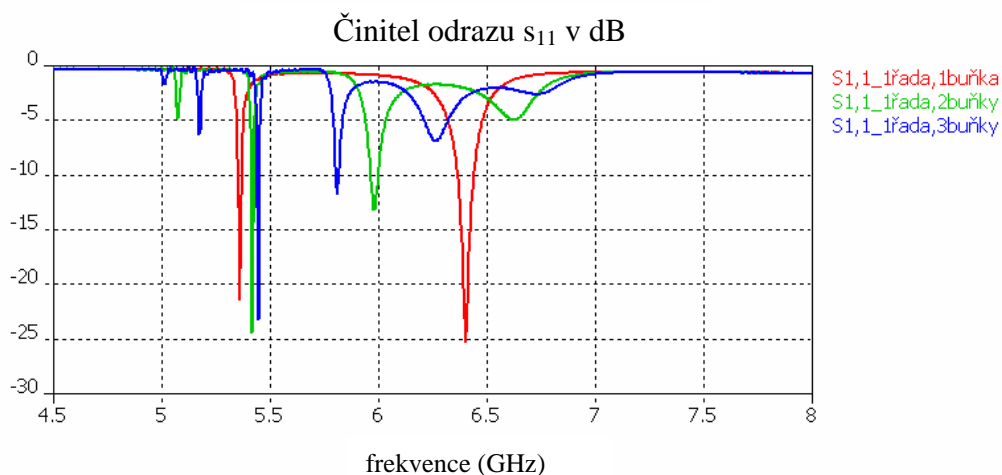
Obr. 6.5 Činitel odrazu antény tvořené jednou řadou CRLH buněk

Na Obr. 6.6 jsou zobrazeny průběhy činitele odrazu pro anténu tvořenou dvěma řadami CRLH buněk. Rozšířením buněk do strany lze pozorovat zvětšení šířky pásma pro dobré impedanční přizpůsobení ($PSV = 2$). Dále si můžeme všimnout, např. pro jednu řadu, jednu buňku a dvě řady, jednu buňku, že rezonance způsobená vlivem LH vlastností vedení zůstala v okolí 5,4 GHz. Nicméně, nulový mód ($n = 0$) určený LH i RH vlastnostmi vedení se přesunul z 6,4 GHz na 6,73 GHz. To je způsobeno snížením kapacity C_R vlivem sousední buňky. Vliv děliče výkonu se projeví převážně ve vyzařovací charakteristice antény.

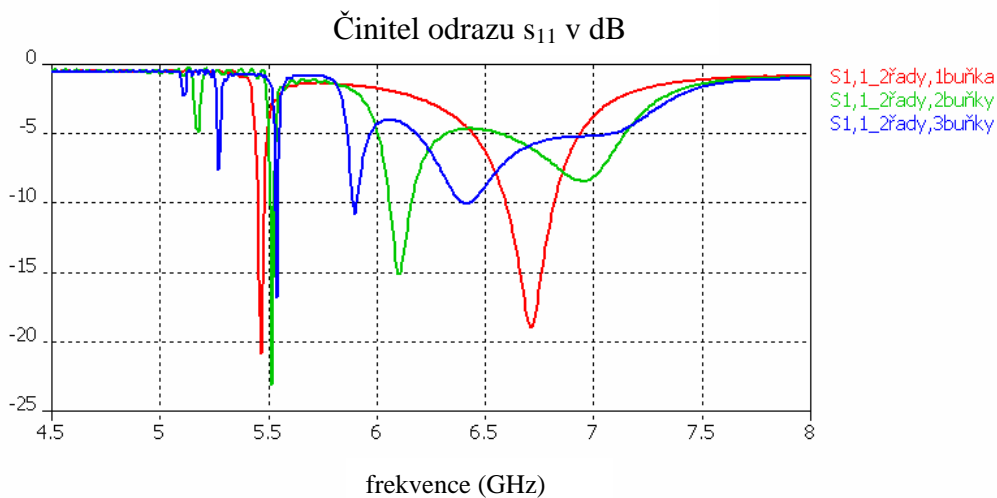


Obr. 6.6 Činitel odrazu antény tvořené dvěma řadami CRLH buněk.

Na Obr. 6.7 je společný průběh činitele odrazu s_{11} antény pro různý počet CRLH buněk v jedné řadě. Na Obr. 6.8 je zobrazen činitel odrazu pro dvě řady CRLH buněk. Původní rezonanční frekvence 5,4 GHz zůstává téměř neměnná s rostoucím počtem buněk, ale vytváří se nové módy mezi původní rezonanční frekvencí a monopolem dané vztahem (3.16).



Obr. 6.7 Společný průběh činitele odrazu antény tvořené jednou řadou CRLH buněk pro různý počet buněk .

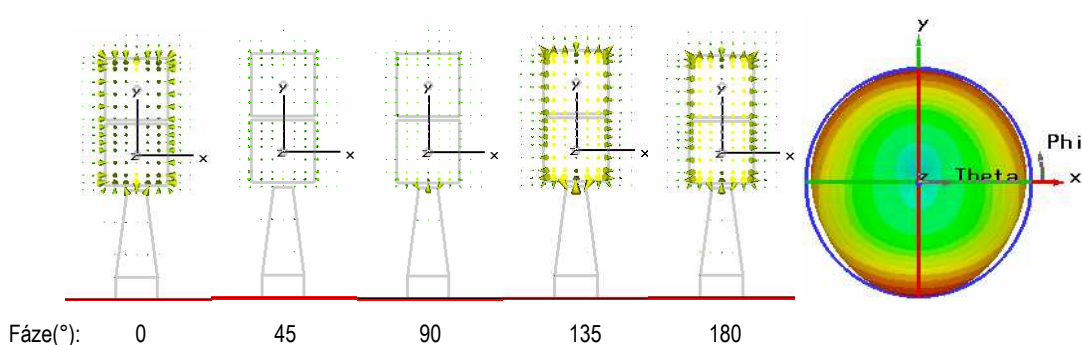


Obr. 6.8 Společný průběh činitele odrazu antény tvořené dvěma řadami CRLH buněk pro různý počet buněk .

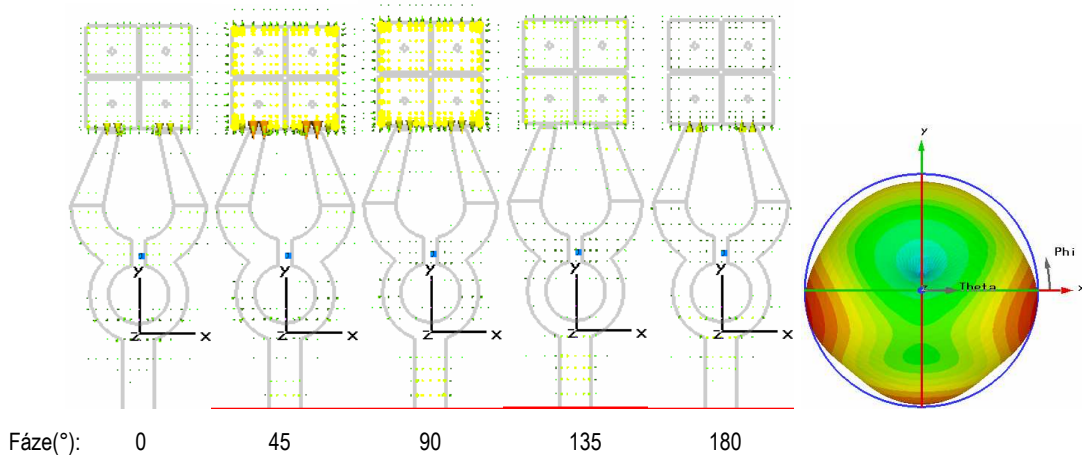
6.2.2 Rozložení proudů na anténách

V této podkapitole jsou uvedeny pro jednotlivé antény a jednotlivé módy jejich činnosti odpovídající rozložení proudu na anténě. Proudová rozložení nám umožní lépe pochopit podstatu jednotlivých módů, které se mohou vybudit. Za povšimnutí stojí fakt, že rozložení proudu na anténním prvku je stejné pro jednu i dvě řady buněk.

Je-li anténní prvek CRLH antény tvořen jednou nebo dvěma řadami buněk, dochází ke vzniku dvou módů v daném kmitočtovém rozsahu. První mód nazýváme monopól ($n = 0$), zde je rozhraní mezi LH a RH vlastnostmi vedení. Rozložení proudu na anténě je zobrazeno na Obr. 6.9. U dvou řad buněk je použit dělič výkonu, který svým vyzařováním deformuje vyzařovací charakteristiku antény viz Obr. 6.10.

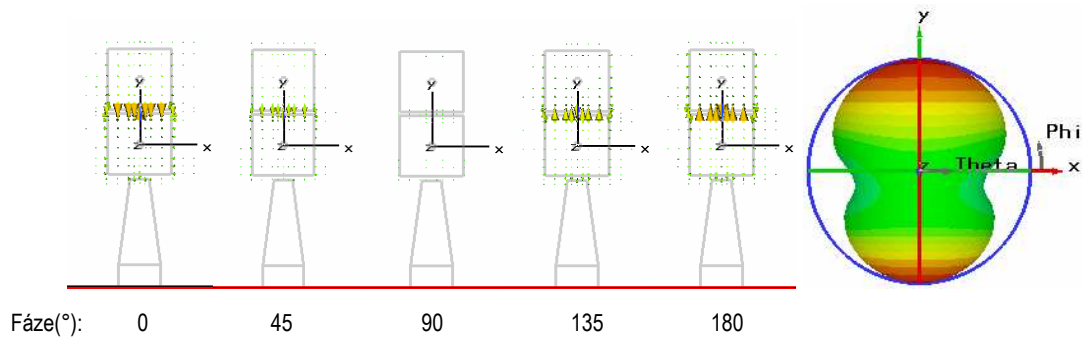


Obr. 6.9 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x1 buňka při $f = 6,40$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.

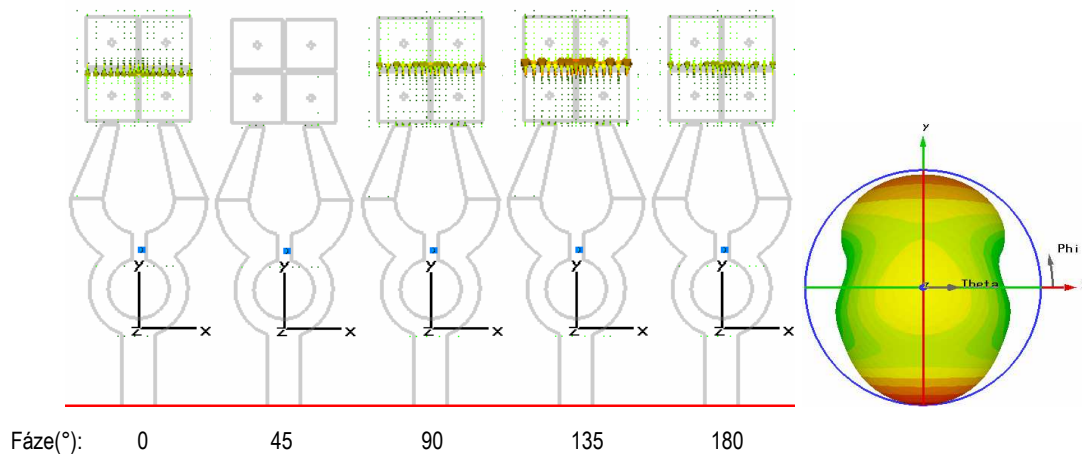


Obr. 6.10 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x1 buňka při $f = 6,72$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.

Rozložení proudu na anténním prvku módu $n = -1$ je zobrazeno na Obr. 6.11 (jedna řada buněk) a na Obr. 6.12 (dvě řady buněk). V tomto režimu se uplatňují levotočivé vlastnosti vedení. Na této frekvenci se neprojevuje nežádoucí efekt vyzařování napájecího vedení jako je tomu u módu $n = 0$.

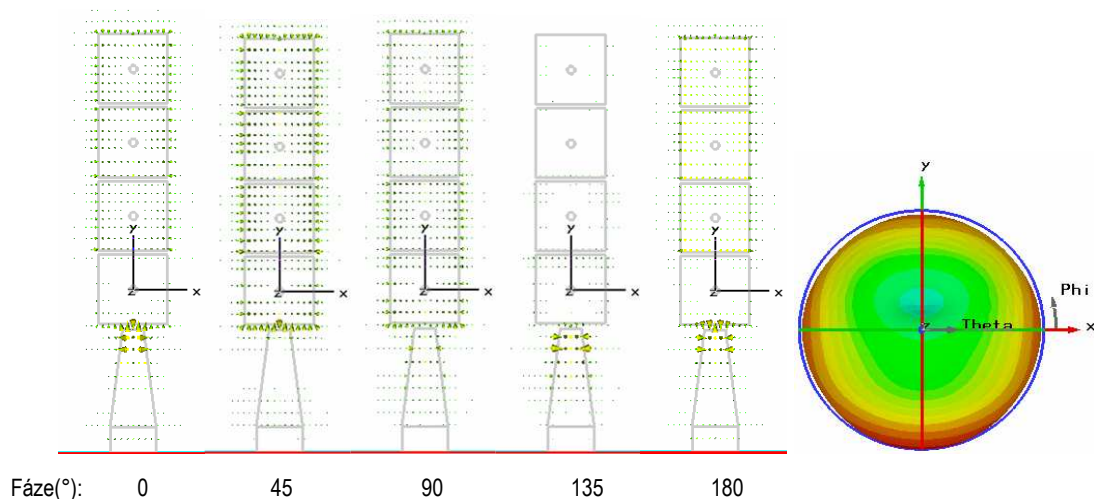


Obr. 6.11 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x1 buňka při $f = 5,36$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.

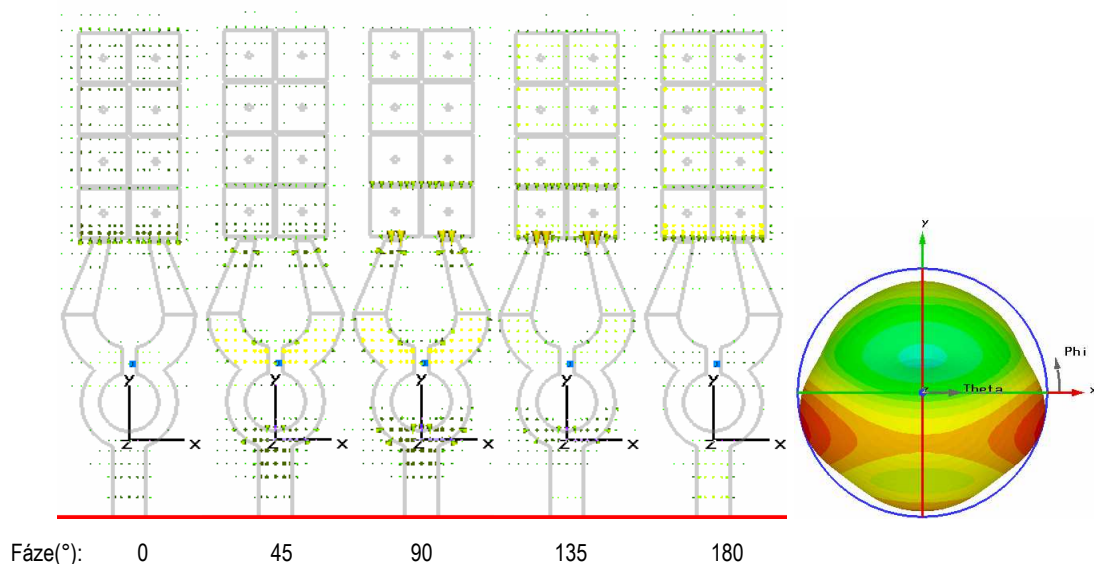


Obr. 6.12 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x1 buňka při $f = 5,47$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.

Skládá-li se anténní prvek CRLH antény ze dvou buněk za sebou (jedna nebo dvě řady), dochází ke vzniku dalšího módu v daném kmitočtovém rozsahu. Dochází k posunu rezonanční frekvence módu $n = 0$ na 6,62 GHz pro jednu řadu buněk. Dvě řady buněk rezonují na kmitočtu 6,97 GHz. Rozdíl mezi frekvencemi je způsoben kapacitní vazbou mezi sousedními CRLH buňkami. Rozložení proudu na anténním prvku pro jednu i dvě řady CRLH buněk je téměř totožné (viz Obr. 6.13, Obr. 6.14). Nevýhodou děliče výkonu jsou jeho rozměry, které se blíží polovině vlnové délky frekvence módu $n = 0$. Značný vliv použití děliče je patrný ve vyzařovací charakteristice na Obr. 6.14.



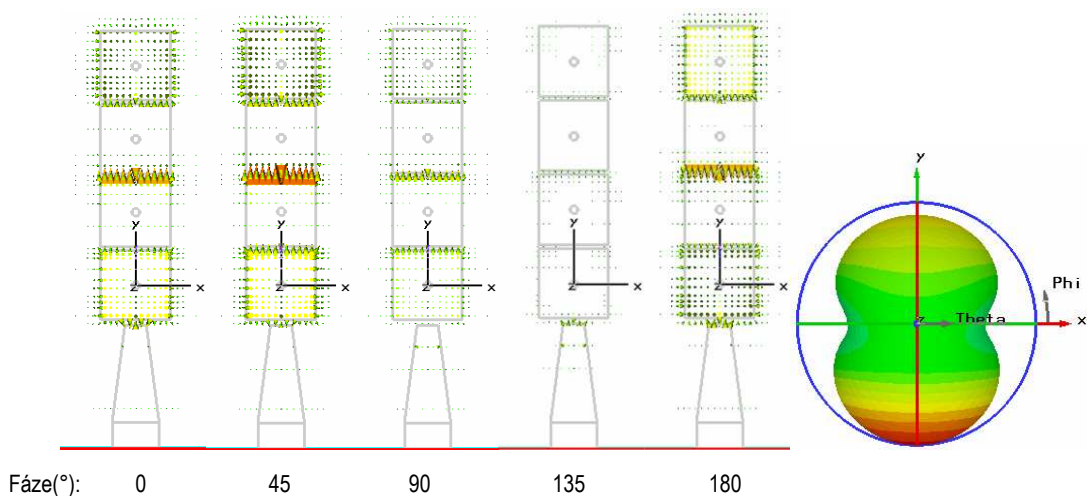
Obr. 6.13 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x2 buňka při $f = 6,62$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.



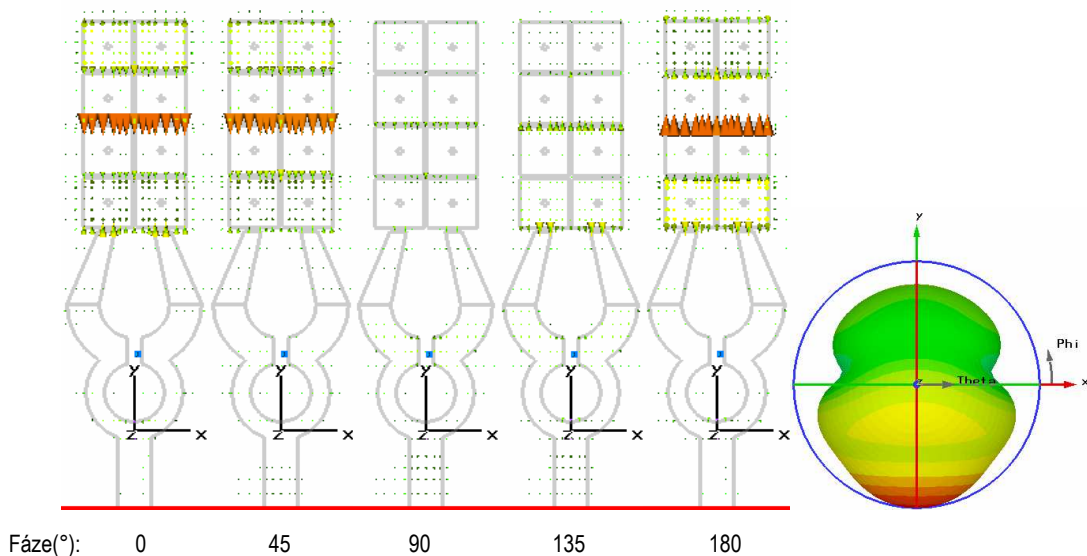
Obr. 6.14 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 6,97$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.

První záporný mód $n = -1$, pro jednu řadu a dvě CRLH buňky, se posouvá na frekvenci 5,99 GHz (Obr. 6.15). Pro dvě řady a dvě buňky je rezonance na 6,11 GHz (viz Obr. 6.16).

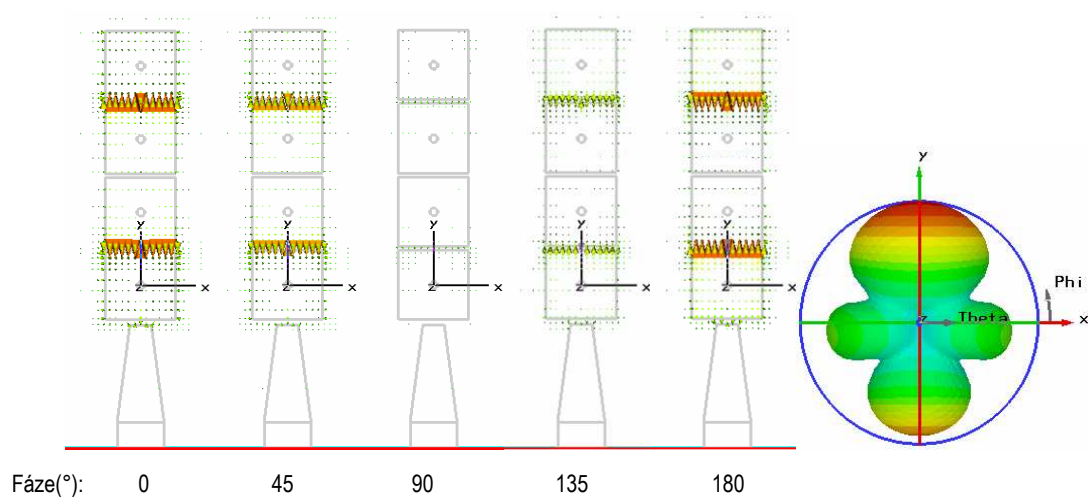
Druhý záporný mód $n = -2$ je pro jednu řadu a dvě CRLH buňky vybuzen na frekvenci 5,42 GHz. Rozložení proudu na anténě pro různé fáze budícího signálu a vzniklá vyzařovací charakteristika je zobrazena na Obr. 6.17. Pro anténu tvořenou 2x2 buňkami je rezonance 5,52 GHz. Tvar vyzařovací charakteristiky antény a rozložení proudu je na Obr. 6.18.



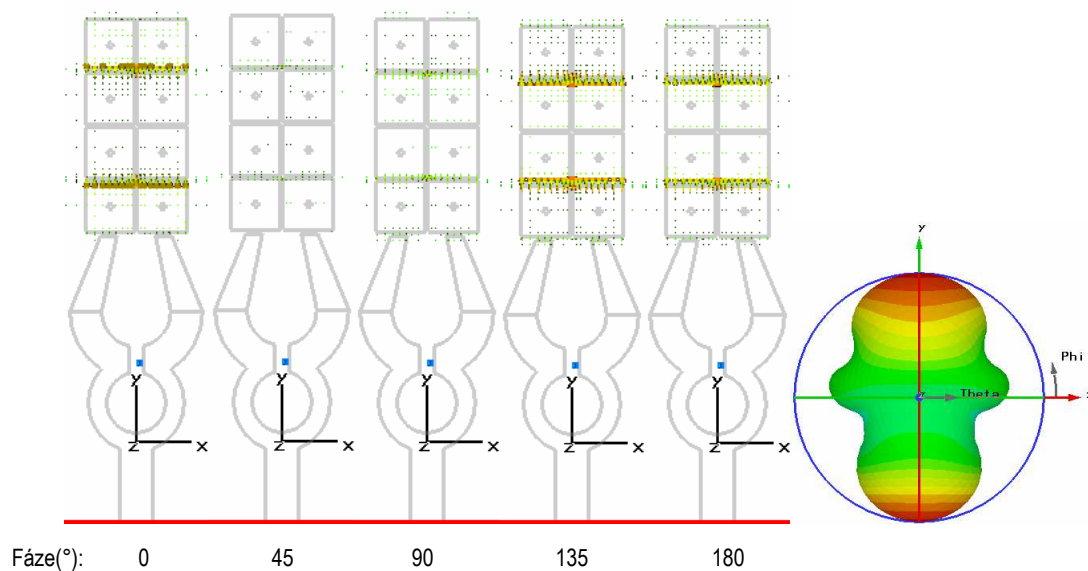
Obr. 6.15 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x2 buňka při $f = 5,99$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.



Obr. 6.16 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 6,11$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.

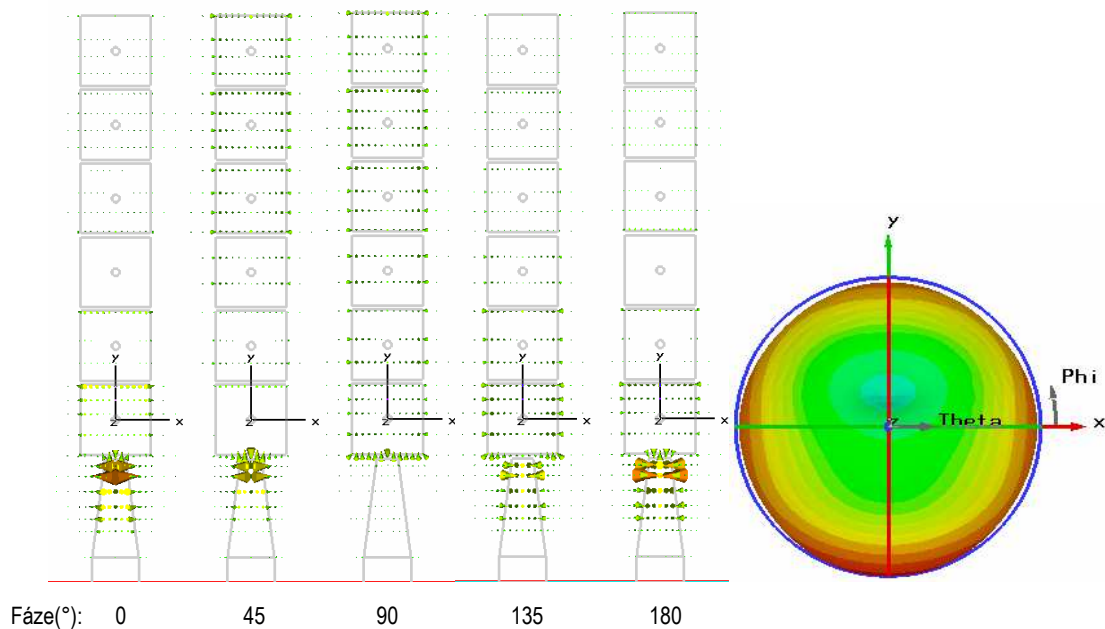


Obr. 6.17 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 5,42$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$.

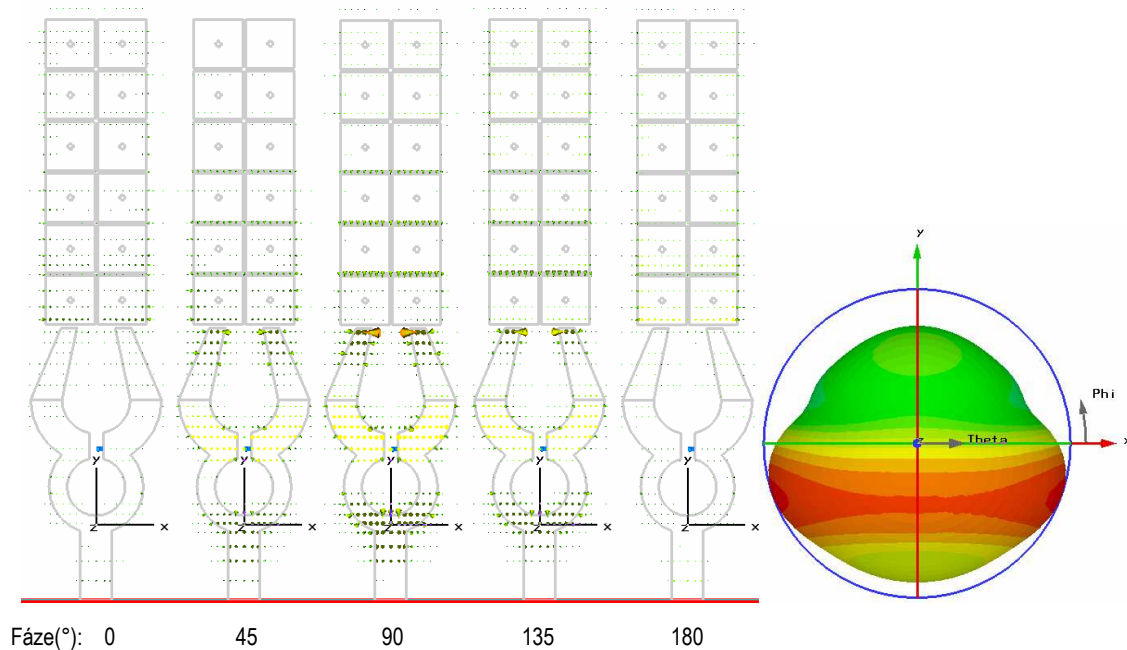


Obr. 6.18 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x2 buňka při $f = 5,52$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -2$.

Přidáme-li třetí buňku, dochází opět k vytvoření nového módu a zároveň k frekvenčním posuvům jednotlivých módů. Anténa tvořená 1x3 buňkami rezonuje v nultém móde ($n = 0$) na frekvenci 6,73 GHz. Je-li přidána druhá řada buněk změní se rezonanční kmitočet na 7 GHz. Vliv vyzařování děliče se značně projevuje ve vyzařovací charakteristice. Rozložení proudů na anténě se 1x3 buňkami na Obr. 6.19 a 2x3 buňkami na Obr. 6.20.

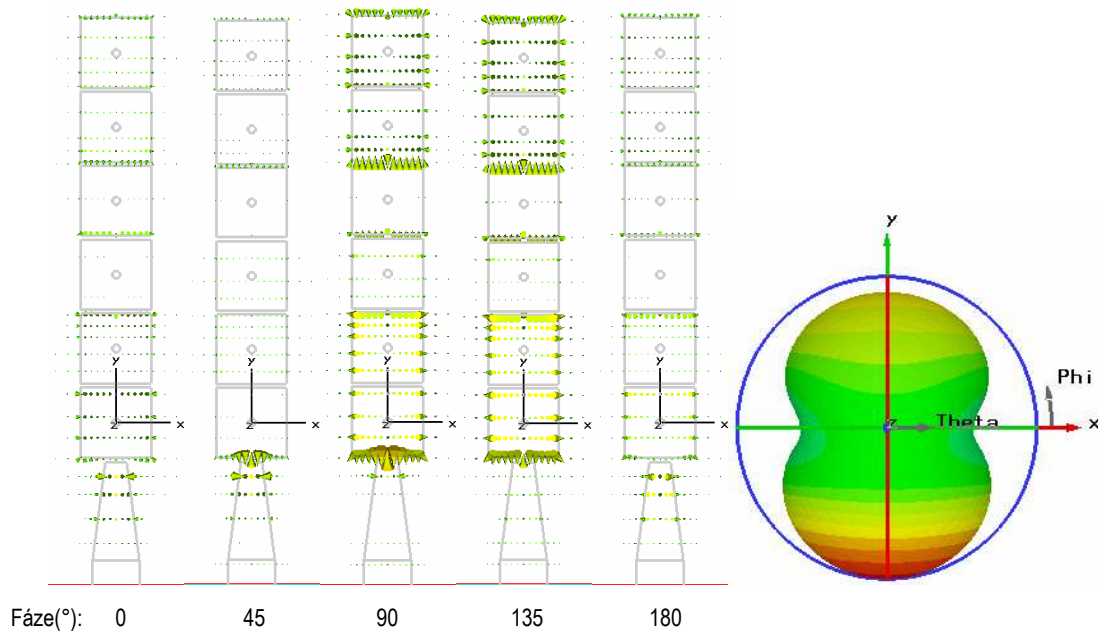


Obr. 6.19 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 6,73$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.

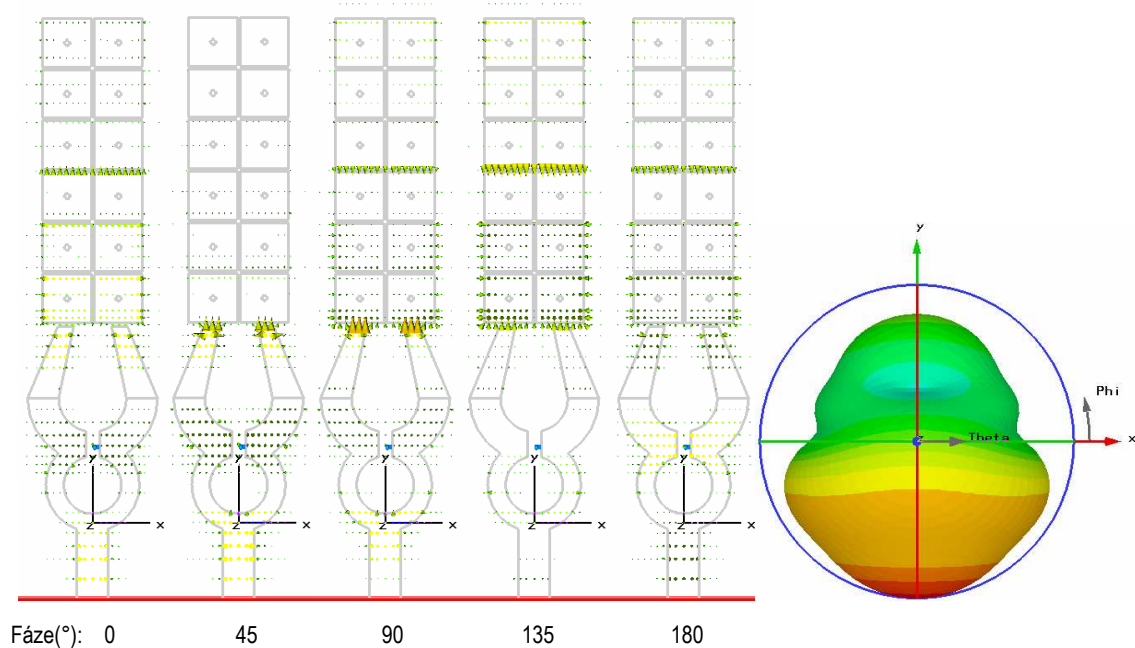


Obr. 6.20 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f = 7,00$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = 0$.

První záporný mód ($n = -1$) pro CRLH anténu s 1x3 buňkami rezonuje na kmitočtu 6,27 GHz. Vlivem druhé řady buněk dochází k posunu rezonanční frekvence na 6,42 GHz. I zde je patrný vliv děliče výkonu a jeho vyzařování. Rozložení proudů na anténě se 1x3 buňkami na Obr. 6.21 a 2x3 buňkami na Obr. 6.22.

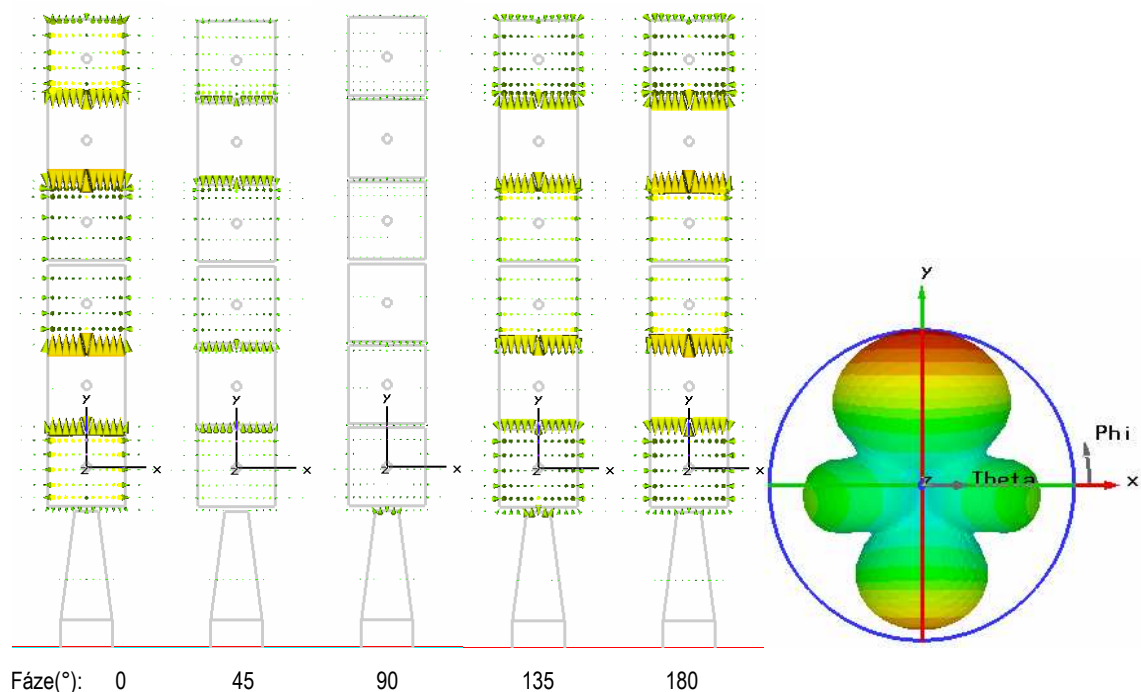


Obr. 6.21 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 6,27$ GHz, vpravo vyzářovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.

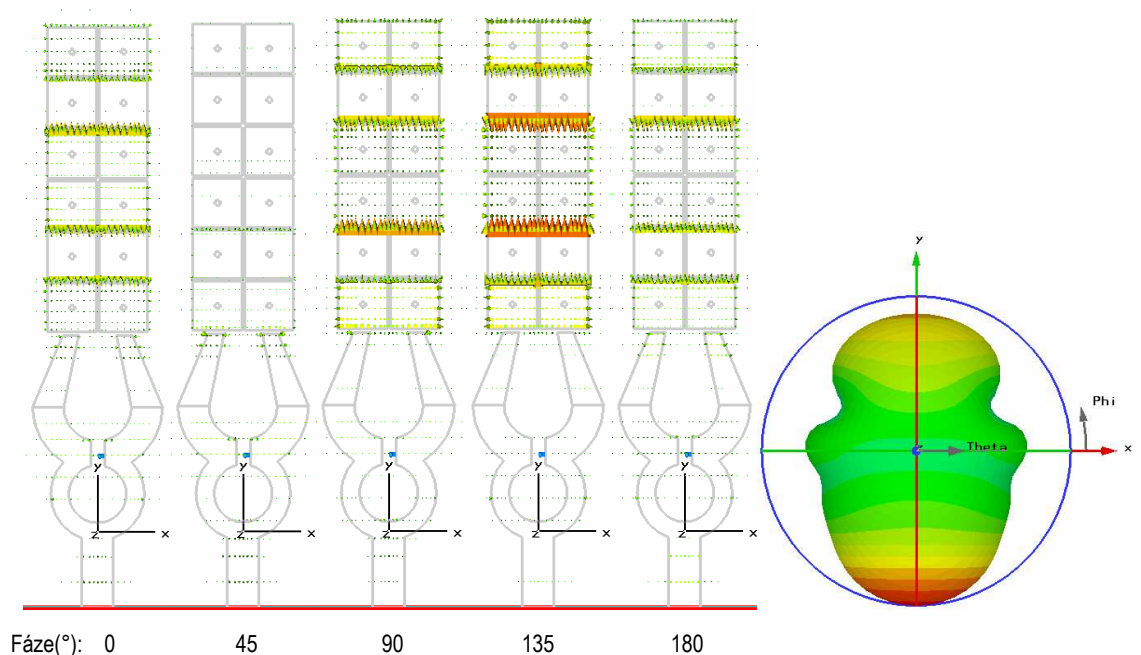


Obr. 6.22 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f = 6,42$ GHz, vpravo vyzářovací charakteristika antény. Mód $n = -1$.

Druhý záporný mód ($n = -2$), který se šíří strukturou se 1x3 buňkami, má rezonanci při frekvenci 5,82 GHz. Rozložení proudu na anténě je zobrazeno na Obr. 6.23. Pro dvě řady buněk je rezonance na 5,91 GHz průběh rozložení proudu je identický s jednou řadou buněk a je zobrazen na Obr. 6.24.

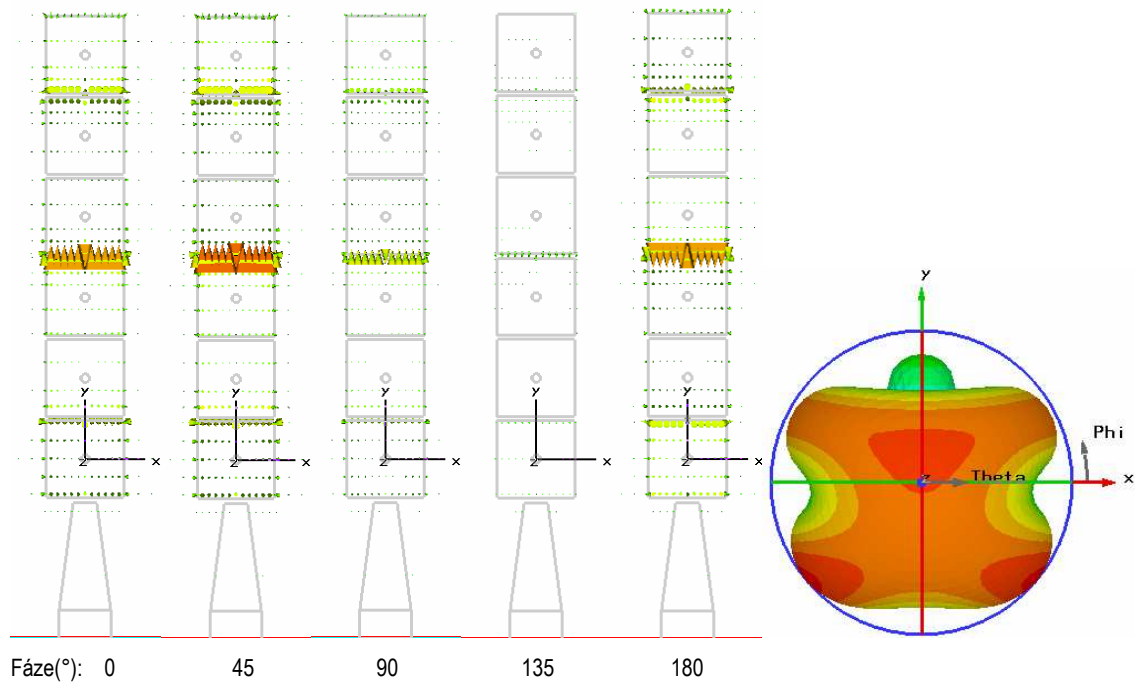


Obr. 6.23 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 5,82$ GHz, vpravo vyzářovací charakteristika antény. Mód $n = -2$.

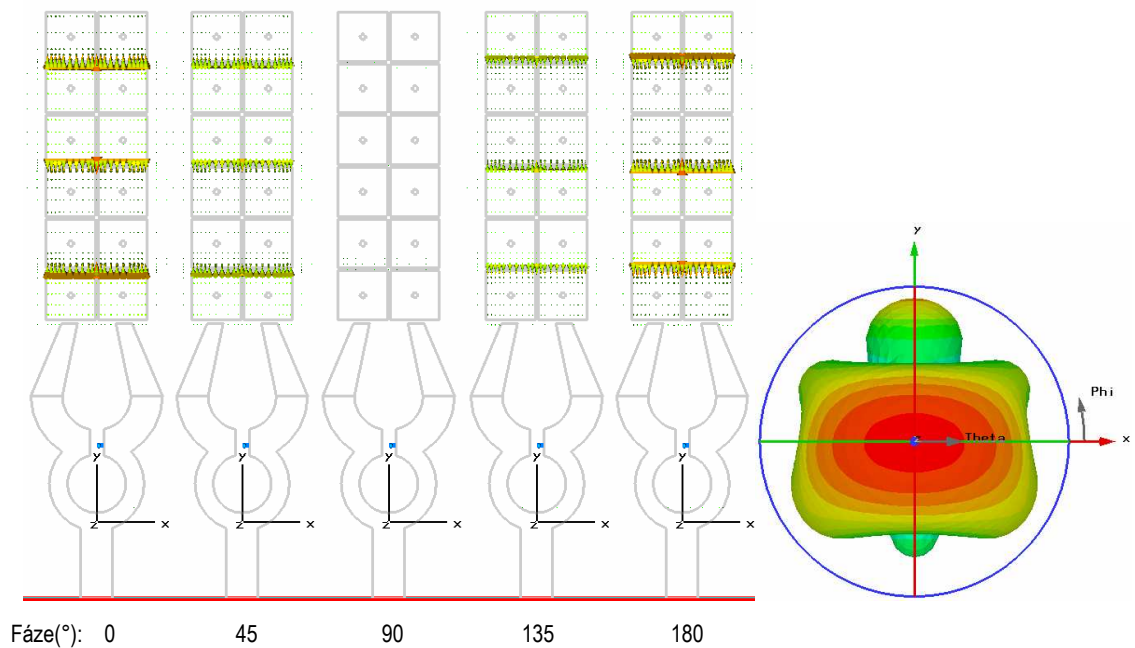


Obr. 6.24 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f = 5,91$ GHz, vpravo vyzářovací charakteristika antény. Mód $n = -2$.

Poslední mód, který ve struktuře se třemi CRLH buňkami vznikl je mód $n = -3$, rezonuje při frekvenci 5,45 GHz pro 1x3 buňky. Pro 2x3 buňky je rezonance na 5,55 GHz. Dělič výkonu se na této frekvenci již neprojevuje nežádoucím vyzařováním. Rozložení proudů na anténě se 1x3 buňkami je na Obr. 6.25 a 2x3 buňkami na Obr. 6.26.



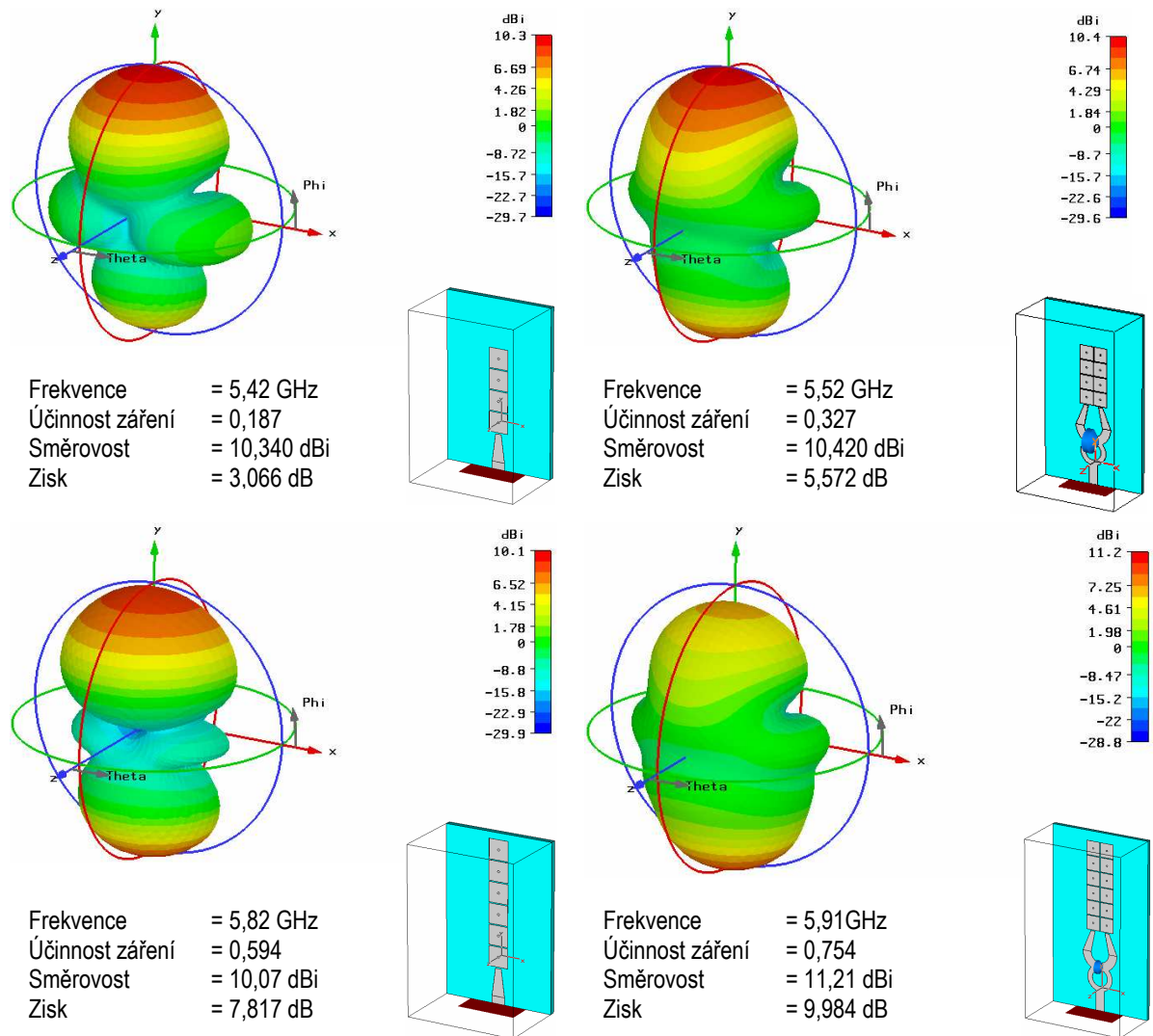
Obr. 6.25 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 1x3 buňky při $f=5,45$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -3$.



Obr. 6.26 Rozložení proudu na anténním prvku pro různé fáze: 2x3 buňky při $f=5,55$ GHz, vpravo vyzařovací charakteristika antény. Mód $n = -3$.

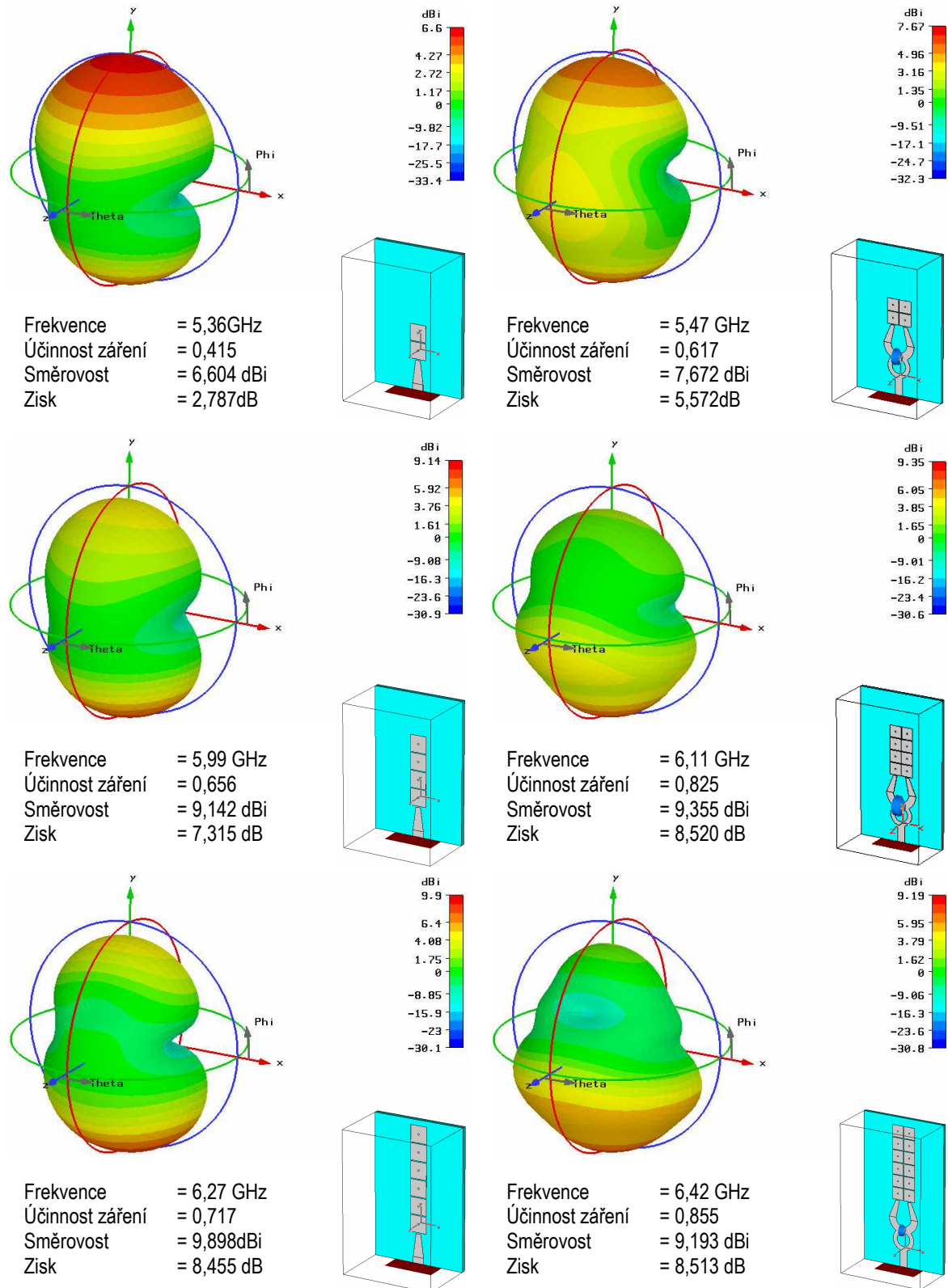
6.2.3 Srovnání jednotlivých módů

V této podkapitole srovnáme nejdříve směrovost jednotlivých módů a následně i zisk antén tvořených různým počtem CRLH buněk. Na Obr. 6.27 je zobrazena vyzařovací směrová charakteristika pro dvě a tři CRLH buňky pracující v druhém záporném módu $n = -2$. Z obrázku je patrné, že s rostoucím počtem buněk se zvětšila účinnost záření a zisk antén.



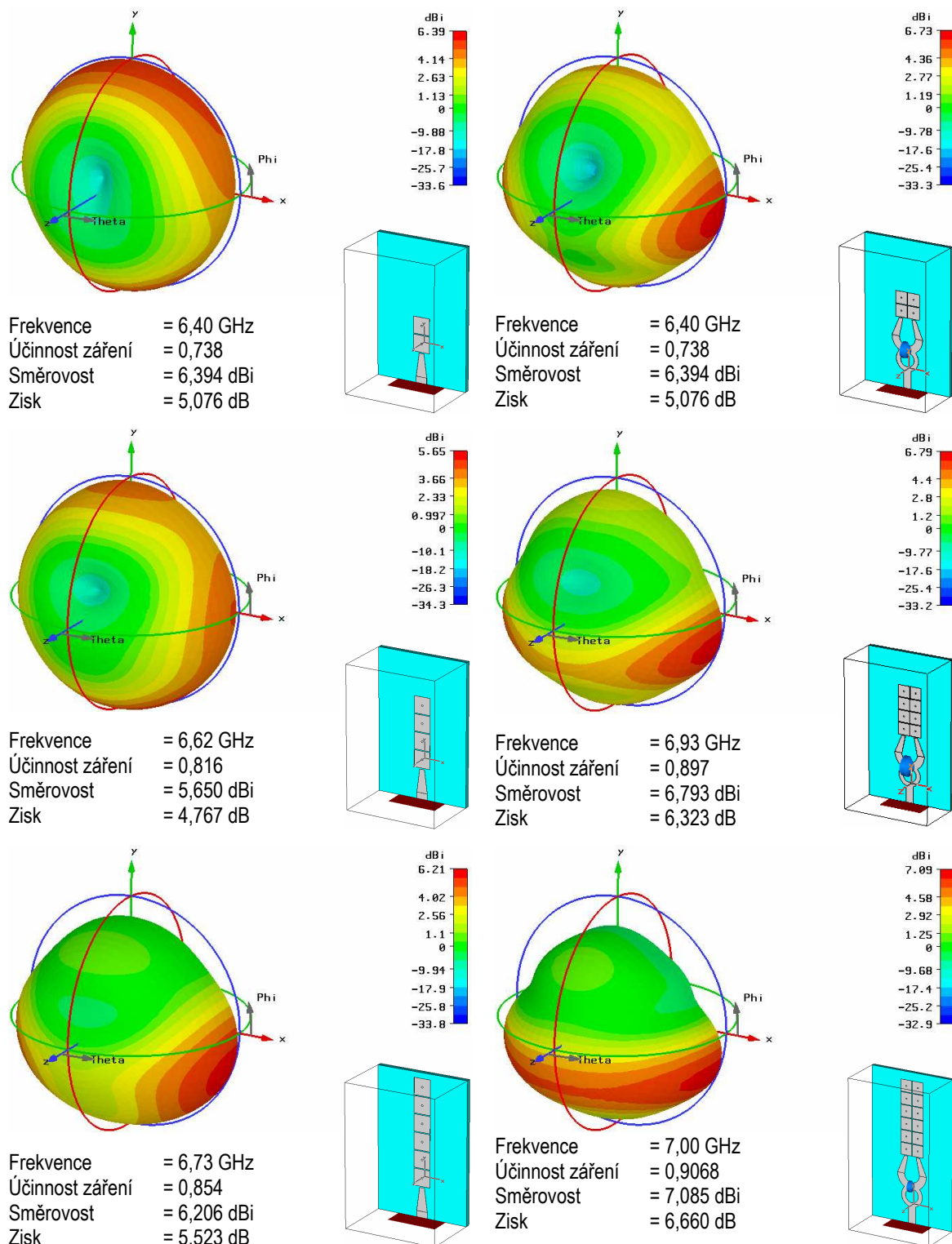
Obr. 6.27 Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro 2 a 3 buňky. Mód $n = -2$.

Anténa složená z jedné, dvou a tří buněk pracující v prvním záporném módu $n = -1$ je zobrazena na Obr. 6.28. Je patrné, že s rostoucím počtem buněk roste nejen rezonanční frekvence módu $n = -1$, ale i účinnost, zisk a směrovost záření antény.



Obr. 6.28 Vyzařovací charakteristiky CRLH antény pro 1, 2 a 3 buňky. Mód $n = -1$.

Na Obr. 6.29 jsou zobrazeny směrové vyzářovací charakteristiky pro daný počet buněk. Tyto antény pracují v nekonečné vlnové rezonanci, nebo-li v módu $n = 0$. S rostoucím počtem buněk dochází k deformaci směrové charakteristiky. Přestože se zvětšuje účinnost záření antény s rostoucím počtem buněk dochází k snížení směrovosti. Počet buněk na zisk antény má jen nepatrný vliv.



Obr. 6.29 Vyzářovací charakteristiky CRLH antény pro 1,2 a 3 buňky. Mód $n = 0$.

Shrnutí získaných parametrů antény pro různý počet buněk a různý mód, ve kterém anténa pracuje, jsou uvedeny v Tab. 6.3. V tabulce jsou vyznačeny nejlepší dosažené hodnoty pro daný parametr. Na základě hodnot v Tab. 6.3. lze říci, že nejlepších parametrů dosahuje anténa tvořená třemi buňkami ve dvou řadách a pracující v módu $n = -2$.

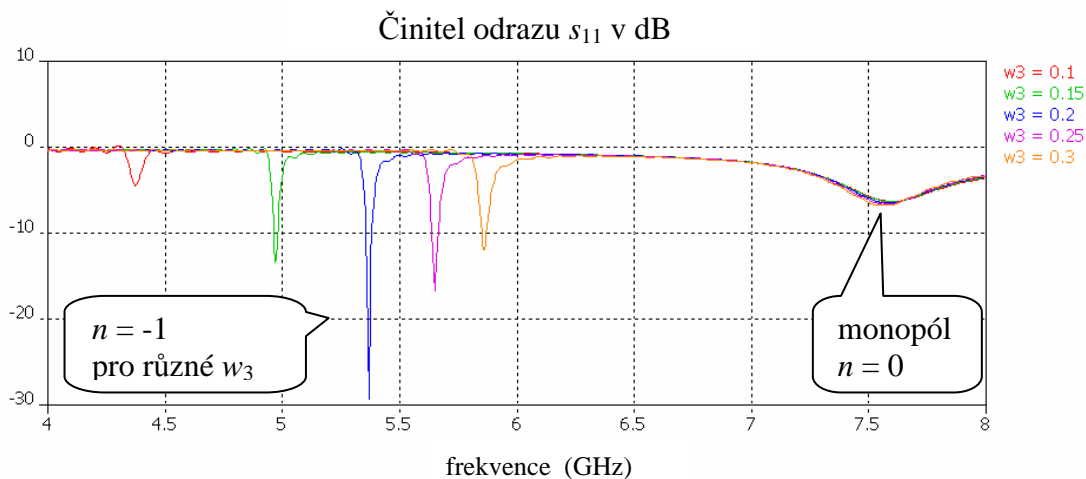
Na základě hodnot z Tab. 6.3 jsou k výrobě vybrány antény skládající se ze jedné a dvou CRLH buněk v jedné a dvou řadách. Antény jsou realizovány dle předloh pro desku plošných spojů DPS v příloze B.

Tab. 6.3 Souhrn výsledku simulace pro různý počet buněk a mód, ve kterém CRLH anténa pracuje. Vyznačeny jsou nejlepší výsledky v dané proměnné.

Mód [-]	Počet řad [-]	Počet buněk [-]	Kmitočet [GHz]	Činitel odrazu [dB]	Účinnost záření [-]	Směrovost záření [dBi]	Zisk antény [dB]
$n = -3$	1	1	-	-	-	-	-
		2	5,08	-4,8	0,086	6,042	4,572
		3	5,45	-23,2	0,122	6,728	2,379
	2	1	-	-	-	-	-
		2	5,18	-4,8	0,139	6,735	1,808
		3	5,55	-16,7	0,319	8,244	3,290
$n = -2$	1	1	-	-	-	-	-
		2	5,42	-24,4	0,187	10,340	3,066
		3	5,82	-10,8	0,595	10,070	7,817
	2	1	-	-	-	-	-
		2	5,52	-23,0	0,327	10,42	5,572
		3	5,91	-10,7	0,754	11,210	9,984
$n = -1$	1	1	5,36	-21,2	0,415	6,604	2,787
		2	5,99	-13,1	0,656	9,142	7,315
		3	6,27	-6,3	0,717	9,898	8,455
	2	1	5,47	-20,8	0,6166	7,672	5,572
		2	6,11	-15,0	0,825	9,355	8,520
		3	6,42	-9,99	0,855	9,193	8,513
$n = 0$	1	1	6,40	-25,1	0,738	6,394	5,076
		2	6,62	-4,9	0,816	5,650	4,767
		3	6,73	-2,5	0,854	6,206	5,523
	2	1	6,72	-18,9	0,867	6,670	6,058
		2	6,97	-8,3	0,897	6,793	6,323
		3	7,00	-5,2	0,907	6,933	6,508

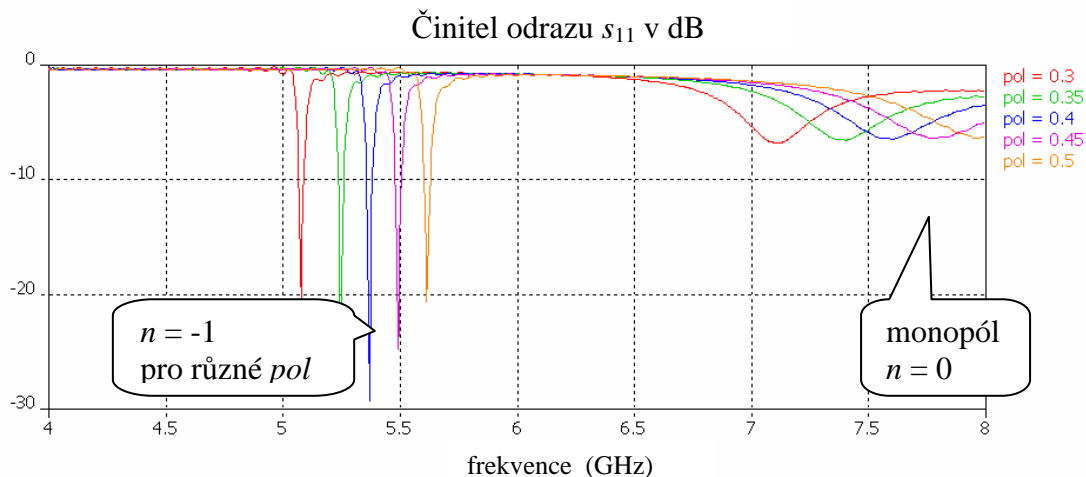
6.2.4 Vliv prvků CRLH buňky

V této kapitole si ukážeme vliv některých prvků CRLH buňky na rezonanční kmitočet. Na Obr. 6.30 je zobrazen vliv kapacity C_L' , která vznikla ve šterbině mezi jednotlivými mikropáskovými prvky, na činitel odrazu s_{11} . S rostoucí vzdáleností w_3 (kapacita C_L' se zmenšuje) roste rezonanční kmitočet. Všimněme si, že kapacita C_L' ovlivňuje pouze levotočivou vlnu a nemá vliv na monopól.



Obr. 6.30 Vliv vzdálenosti mezi flíčky w_3 na činitel odrazu s_{11} .

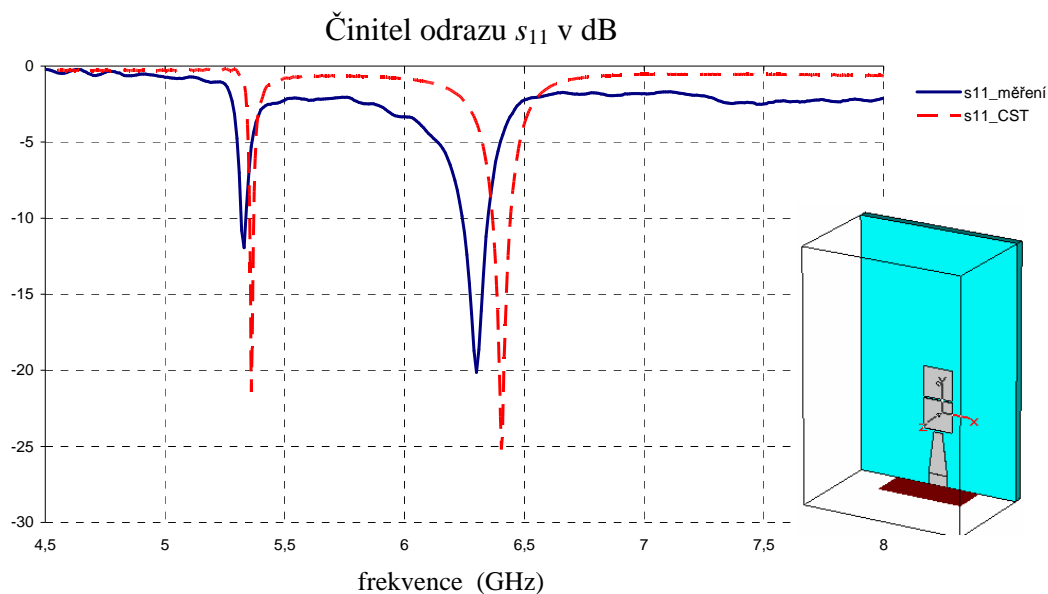
Indukčnost L_L' je vytvořena pokovenou dírou, která je umístěna do geometrického středu mikropásku a je spojena se zemní deskou. Vliv jejího poloměru na činitel odrazu s_{11} je uveden na Obr. 6.31. Z obrázku je patrné, že změnou průměru propojky se mění rezonanční frekvence LH vlny i monopólu. S rostoucím poloměrem propojky klesá plocha kapacitoru C_R' a hodnota indukčnosti L_R' . Tyto změny ovlivňují i frekvenci monopólu.



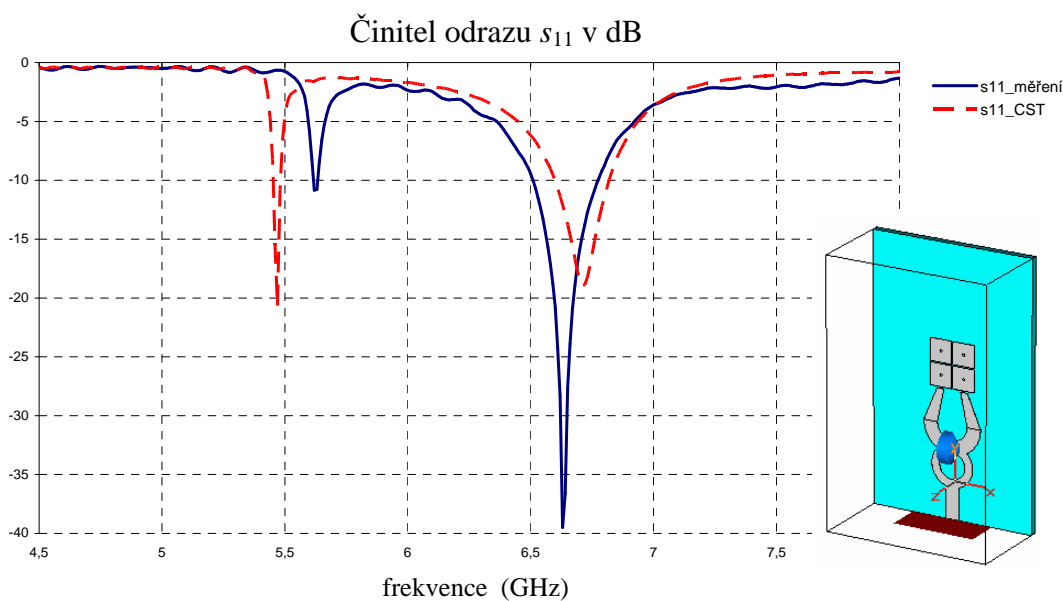
Obr. 6.31 Vliv poloměru via na činitel odrazu s_{11} .

6.3 Výsledky měření CRLH antény

V této podkapitole jsou zobrazeny výsledky měření činitele odrazu CRLH antény pomocí skalárního obvodového analyzátoru Anritsu 54147A. Jednotlivé antény jsou opatřeny SMA konektorem pro připojení měřící sondy. Na *Obr. 6.32* a *Obr. 6.33* jsou zobrazeny kmitočtové průběhy činitele odrazu pro anténu tvořenou jednou buňkou. Změřené průběhy se blíží hodnotám získaných simulací.

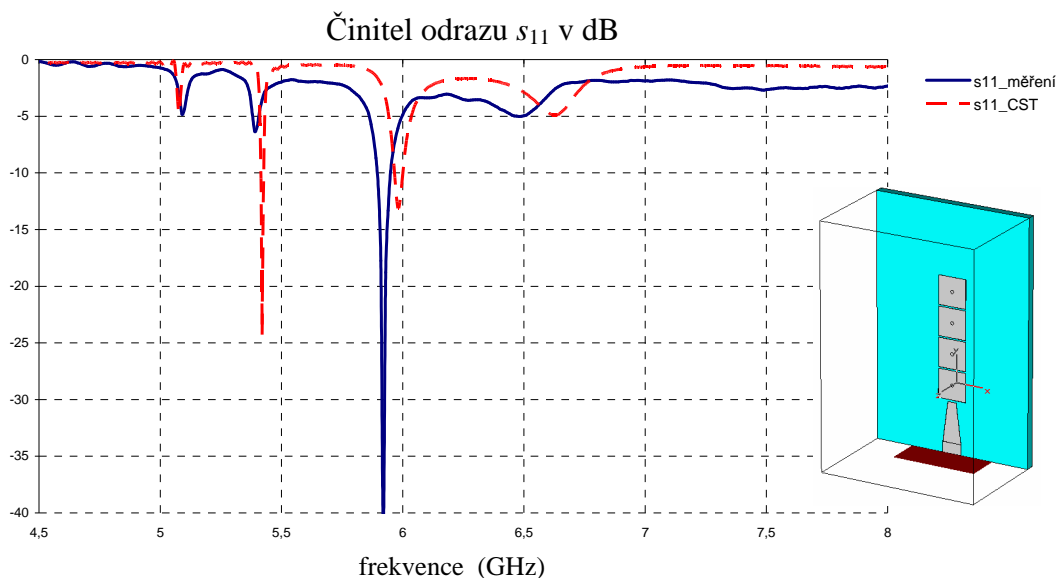


Obr. 6.32 Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 1x1 CRLH buňkou.

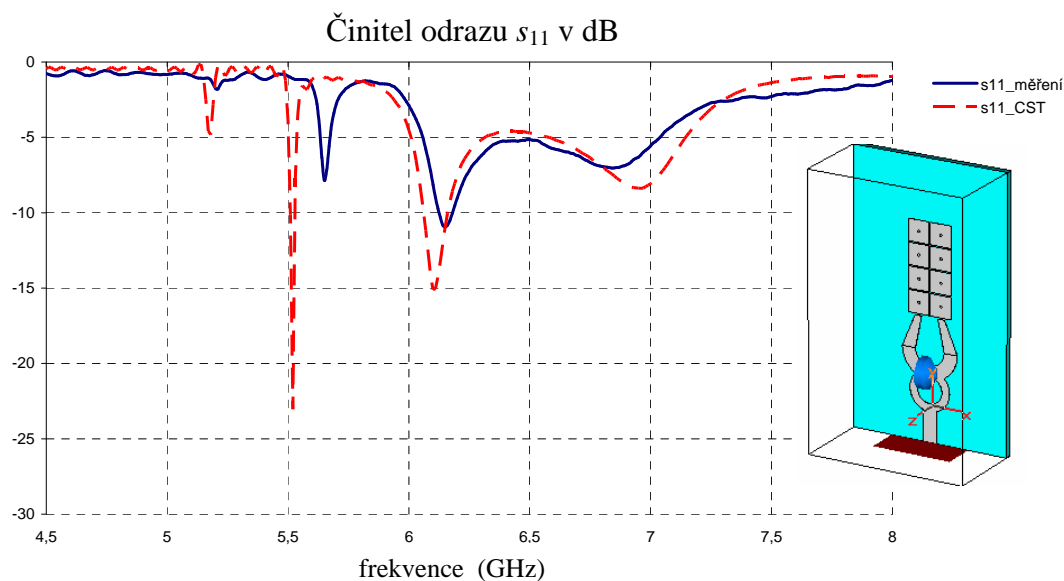


Obr. 6.33 Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 2x1 CRLH buňkami.

Rezonanční kmitočet je velmi náchylný na přesnost zhotovení. Např. změnil-li se mezerka mezi mikropásky (parametr CRLH vedení C_L') z 0,2 mm na 0,25 mm, vlivem použité leptací technologie, dojde k posunu rezonance o 0,3 GHz (viz Obr. 6.30). Změřený činitel odrazu pro dvě CRLH buňky je zobrazen na Obr. 6.35 a Obr. 6.34, kde jsou buňky ve dvou řadách. Opět změřený signál relativně kopíruje předpokládaný simulační průběh. Nedokonalost při výrobě a celková realizace se projevují na rezonační kmitočtu i impedančním přizpůsobení vstupní brány.



Obr. 6.34 Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 1x2 CRLH buňkami.



Obr. 6.35 Průběh činitele odrazu s_{11} pro anténu tvořenou 2x2 CRLH buňkami.

7 ZÁVĚR

Planární antény hrají stále důležitější roli zejména v automobilovém průmyslu a letectví (lze je snadno integrovat do karosérie auta či pláště letounu). Mezi základní představitele planárních antén patří konvenční flíčková anténa, která pracuje v půlvlnné rezonanci. Rozměry antény jsou tedy dány pracovním kmitočtem.

Tato práce se zabývá levotočivými a pravotočivými vlastnostmi přenosového vedení a jejich využitím ke zmenšení rozměrů antény. Jejich kombinací lze realizovat anténu, jejíž rezonance je určena prvky CLRH vedení.

V úvodní části je ověřen návrh antény z článku [1], kde struktura tvoří tzv. hříbky. Změnou rozměrů prvků lze ovlivňovat pracovní kmitočet antény. Fyzické rozměry antény jsou dány jen způsobem realizace uvedených prvků. Prvky C_L' a L_L' (podélná kapacita a příčná indukčnost) určují levotočivé chování vedení, prvky L_R' a C_R' (podélná indukčnost a příčná kapacita) určují nežádoucí pravotočivé chování CRLH struktury. K modelování navržené rezonanční antény jsem použil program CST Microwave Studio. Simulace prokázaly, že anténa pracuje ve dvou módech. Při frekvenci 2,9 GHz anténa pracuje v režimu $n = -1$, kdy materiál vykazuje záporné materiálové konstanty. Projevují se zde hlavně levotočivé vlastnosti určené prvky C_L' a L_L' . V druhém režimu $n = 0$, který nastává na kmitočtu $f = 3,86$ GHz, je konstanta šíření nulová. V této situaci je vedení na rozhraní mezi levo-pravotočivými vlastnostmi a anténa se chová jako monopól. Při odstranění mezery mezi flíčky, která představuje C_L' , je získána indukčně vázaná anténa pracující pouze v režimu $n = 0$. Dále byla navržena konvenční flíčková anténa, která pracuje v režimu $n = 1$, se stejným rezonančním kmitočtem jako CRLH anténa v módu $n = -1$. Na základě simulací těchto dvou antén byly porovnány jejich vlastnosti. Zaměřil jsem se zejména na činitel odrazu a vyzařovací charakteristiku antény. Při srovnání CRLH a flíčkové antény na kmitočtu $f = 2,9$ GHz je patrné, že flíčková anténa dosahuje větší šířky pásma i lepšího impedančního přizpůsobení. Co se týká vyzařovací charakteristiky, flíčková anténa jako jediná nevyzařuje do roviny substrátu. Směrovost i účinnost této antény dosahuje lepších hodnot než CRLH anténa. CRLH anténa má dva hlavní laloky v rovině substrátu. Rozměry anténní plochy flíčkové antény jsou 40,0 mm × 31,6 mm a CRLH antény 15,0 mm × 14,8 mm.

Pro zapojenou dvou řad CRLH buněk jsem navrhl mikropáskový Wilkinsonův dělič výkonu 3 dB. Tzn. teoreticky vstupní signál je rovnoměrně dělen na polovinu na obě výstupní brány. V praxi dosahoval realizovaný dělič přenosu mezi vstupní a výstupní bránou 3,8 dB v důsledku útlumu na konektorech, mikropáskových vedeních a použitím SMD odporu. Ani činitel odrazu nevyšel dle návrhu (viz Obr. 5.9). I přes tyto nežádoucí výsledky, je dosaženo dobrého impedančního přizpůsobení ($PSV = 2$) na vstupní bráně v rozsahu frekvencí 1 až 7 GHz.

Upravil jsem CRLH anténu na frekvenci 5,4 GHz a podrobně prozkoumal vliv přidání CRLH buněk na výsledné vlastnosti antény. Simulacemi je potvrzen předpoklad dle [1], že s rostoucím počtem buněk roste směrovost a zisk antény. Souhrn dosažených

výsledku je uveden v *Tab. 6.3*. Antény s nejlepšími výsledky jsem realizoval podle předlohy uvedené v příloze B. Výsledky měření těchto antén jsou uvedeny v kapitole 6.3. Změřené průběhy činitele odrazu se blíží výsledkům simulace v programu CST MWS. V posledním bodě jsem ukázal vliv prvků CRLH buňky na kmitočtový průběh činitele odrazu s_{11} . Anténa tvořená CRLH vedením dosahuje menších rozměrů než konveční flíčková anténa. I přes nižší zisk a šířku pásma, pro dobré impedanční přizpůsobení, má CRLH anténa velký potenciál hlavně při tvorbě vícepásmových antén.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LAI, A., LEONG, M. K. H., ITOH, T. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2007, vol. 55, no. 3, p. 868-876.
- [2] LAI, A., ITOH, T., CALOZ, C. Composite right/left-handed transmission line metamaterials. *IEEE Microwave Magazine*. 2004, p. 34-50.
- [3] WATERHOUSE, R. B., TARGONSKI, S. D., KOKOTOFF, M. Design and performance of small printed antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1998, vol. 46, no. 11, p. 1629-1633.
- [4] BUCHAR, P. Disperzní charakteristiky kompozitního periodického prostředí: Diplomová práce. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2004. 51 s.
- [5] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2000.
- [6] SVAČINA, J. *Mikrovlnná integrovaná technika*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [7] LAI, A., LEONG, K.M.K.H., TATSUO, I. Dual-mode compact microstrip antenna based on fundamental backward wave. *Microwave Conference Proceedings, 2005. APMC 2005. Asia-Pacific Conference Proceedings*. Dec. 2005, vol. 4, p. 1- 4. Digital Object Identifier 10.1109/APMC.2005.1606881
- [8] SIVENPIPER, D.,ZHANG, L., BROAS, F. J., ALEXOPULOS, N. G., YABLONOVITCH, E. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions. Microwave Theory Tech*. Nov. 1999, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074.
- [9] BALANIS, C.A., *Antenna Theory*, 2nded. John Wiley & Sons, New York 1997, str. 1136.
- [10] Computer Simulation Technology – CST, *High frequency design and analysis (Getting Started, Tutorial, Advanced Topics,Program help)*, 2003
Dostupné na WWW:< <http://www.cts.com/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

C_L'	Sériová kapacita CRLH vedení	$F \cdot m^{-1}$
C_R'	Paralelní kapacita CRLH vedení	$F \cdot m^{-1}$
\mathbf{E}	Vektor intenzity elektrického pole	$V \cdot m^{-1}$
f	Kmitočet	Hz
G	Zisk antény	dB
\mathbf{H}	Vektor intenzity magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
h	Tloušťka dielektrického substrátu	mm
\mathbf{k}	Vlnový vektor	m^{-1}
k	Konstanta šíření	m^{-1}
L_L'	Paralelní indukčnost CRLH vedení	$H \cdot m^{-1}$
L_R'	Sériová indukčnost CRLH vedení	$H \cdot m^{-1}$
L	Délka flíčku dle příslušného obrázku	mm
l_{1-2}	Parametr antény dle příslušného obrázku	mm
N	Počet CRLH buněk	-
n	Mód rezonance	-
p	Délka jedné CRLH buňky	-
r	Poloměr pokovené díry - VIA	mm
s_{11}	Činitel odrazena bráně 1	dB
s_{12}	Přenos mezi bránami 1 a 2	dB
t	Tloušťka pokovení	mm
W	Šířka flíčku dle příslušného obrázku	mm
w_{1-5}	Parametr antény dle příslušného obrázku	mm
w'	Korigovaná hodnota w pro nenulovou tloušťku pokovení	mm
$\Delta w'$	Korekce na nenulovou tloušťku horního pásu	mm
Y'	Paralelní admitance CRLH vedení	S
Z_0	Charakteristická impedance vedení	Ω
Z_{1-3}	Charakteristická impedance vedení	Ω
Z'	Sériová impedance CRLH vedení	Ω

α	(alfa)	Měrný vlnový útlum	$\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$
β	(beta)	Fázová konstanta	$\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$
β_n	(beta)	Fázová konstanta pro n-tý mód	$\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$
ϵ_0	(epsilon)	Permitivita vakua	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$
$\epsilon_{\text{r,ef}}$	(epsilon)	Efektivní permitivita dielektrika	-
ϵ_{r}	(epsilon)	Relativní permitivita dielektrika	-
η	(éta)	Vlnová impedance	Ω
θ	(théta)	Úhel od roviny y-z	°
λ_0	(lamda)	Vlnová délka elektromagnetických vln ve vakuu	m
λ_g	(lamda)	Vlnová délka elektromagnetických vln v prostředí	m
μ_0	(mý)	Permeabilita vakua	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$
$\mu_{\text{r,ef}}$	(mý)	Efektivní permeabilita dielektrika	-
μ_{r}	(mý)	Relativní permeabilita dielektrika	-
π	(pí)	Ludolfovo číslo	-
φ	(fí)	Úhel od roviny x-z	°
ω_{par}	(omega)	Úhlový kmitočet paralelní kombinace CRLH prvků	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
ω_{ser}	(omega)	Úhlový kmitočet sériové kombinace CRLH prvků	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
ω_L	(omega)	Úhlový kmitočet LH prvků CRLH vedení	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
ω_R	(omega)	Úhlový kmitočet RH prvků CRLH vedení	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
ω_n	(omega)	Úhlový kmitočet n-tého módu	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

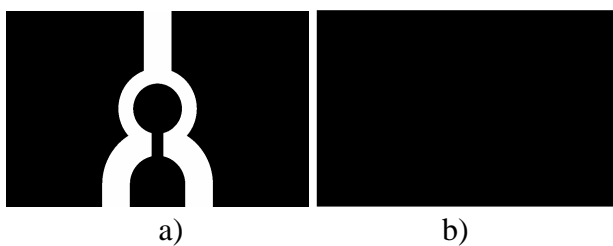
FD-TD (finite difference time domain)	Metoda konečných diferencí v časové oblasti
RH (right- handed)	Pravotočivé vlastnosti
LH (left- handed)	Levotočivé vlastnosti
CRLH (combined right-left- handed)	Kombinované pravo- levotočivé
PBC (periodic boundary conditions)	Periodické okrajové podmínky
WDV	Wilkinsonův dělič výkonu
PSV	Poměr stojatých vln

SEZNAM PŘÍLOH

A	WILKINSONŮV DĚLIČ VÝKONU	66
A.1	WDV - DESKA PLOŠNÉHO SPOJE	66
A.2	WDV - REALIZACE	66
B	CRLH ANTÉNA	67
B.1	1x1 CRLH BUŇKA – DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	67
B.2	1x1 CRLH BUŇKA – REALIZACE	67
B.3	1x2 CRLH BUŇKA – DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	68
B.4	1x2 CRLH BUŇKA – REALIZACE	68
B.5	2x1 CRLH BUŇKY– DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	69
B.6	2x1 CRLH BUŇKA – REALIZACE	69
B.7	2x2 CRLH BUŇKY– DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	70
B.8	2x2 CRLH BUŇKA – REALIZACE	70

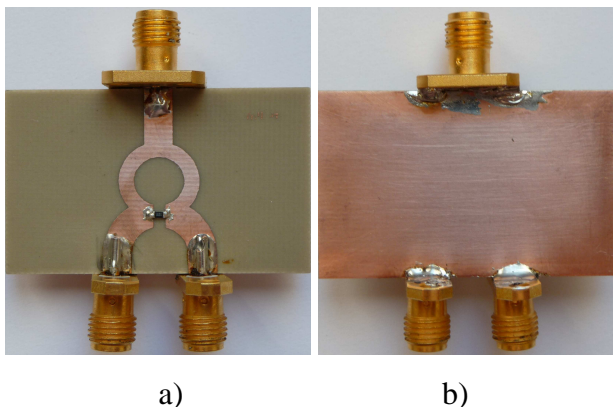
A WILKINSONŮV DĚLIČ VÝKONU

A.1 WDV - deska plošného spoje



Rozměr desky 40,0 x 25,4 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

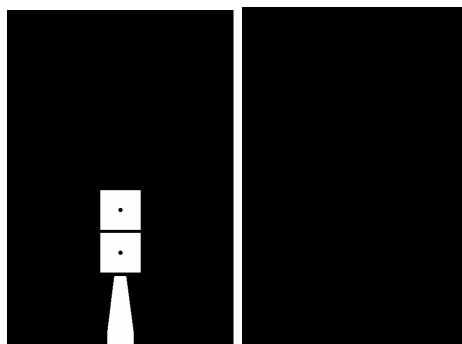
A.2 WDV - realizace



Rozměr desky 40,0 x 25,4 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B CRLH ANTÉNA

B.1 1x1 CRLH buňka – deska plošných spojů

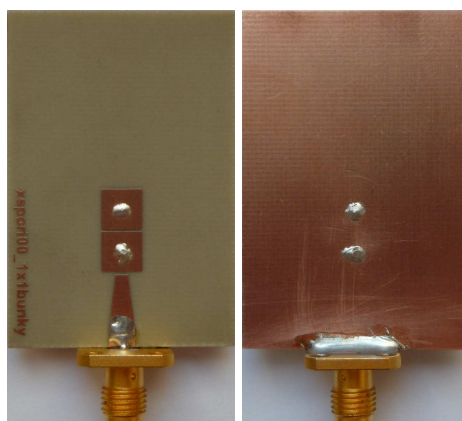


a)

b)

Rozměr desky 30,0 x 45,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.2 1x1 CRLH buňka – realizace

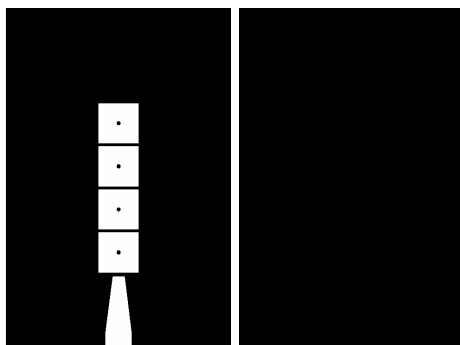


a)

b)

Rozměr desky 30,0 x 45,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.3 1x2 CRLH buňka – deska plošných spojů

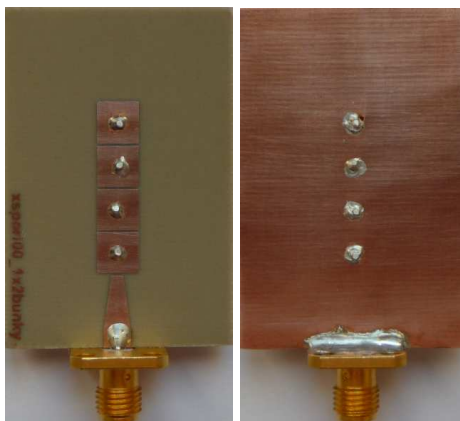


a)

b)

Rozměr desky 30,0 x 45,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.4 1x2 CRLH buňka – realizace

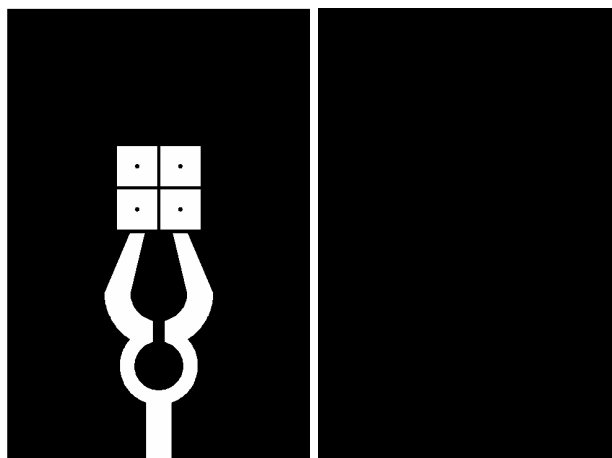


a)

b)

Rozměr desky 30,0 x 45,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.5 2x1 CRLH buňky– deska plošných spojů

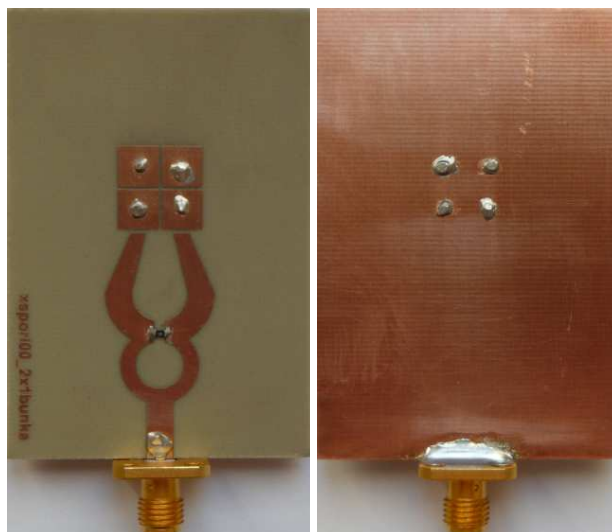


a)

b)

Rozměr desky 40,0 x 60,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.6 2x1 CRLH buňka – realizace

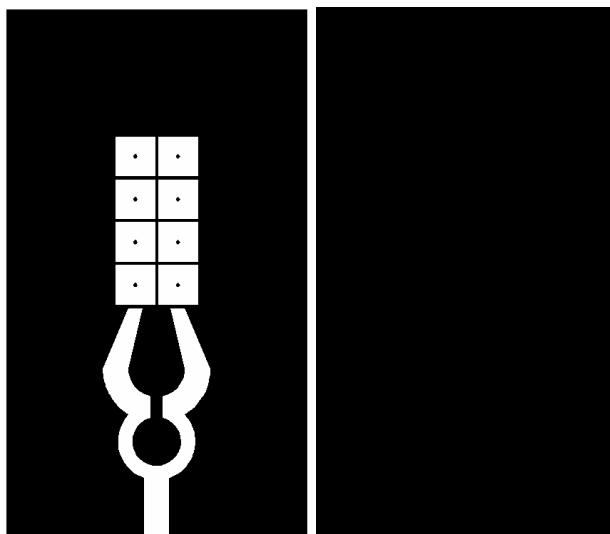


a)

b)

Rozměr desky 40,0 x 60,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.7 2x2 CRLH buňky– deska plošných spojů

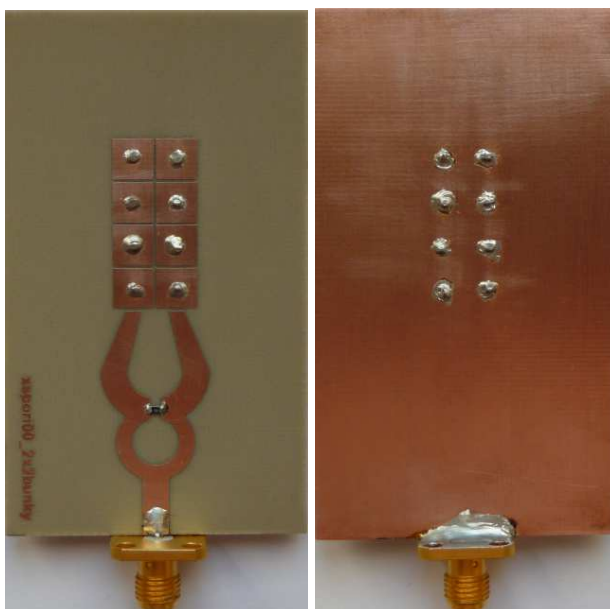


a)

b)

Rozměr desky 40,0 x 70,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).

B.8 2x2 CRLH buňka – realizace



a)

b)

Rozměr desky 40,0 x 70,0 [mm], měřítko M1:1:
a) top (strana součástek), b) bottom (strana plošných spojů).